INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | HONGOS, LA NUEVA AMENAZA | CUÁNTICA Y CAUSALIDAD | ECONOMÍAS ALTERNATIVAS PARA LA SOSTENIBILIDAD | N.º 539 | AGOSTO 2021

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Agosto 2021 • N.º 539 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

HONGOS, LA NUEVA AMENAZA

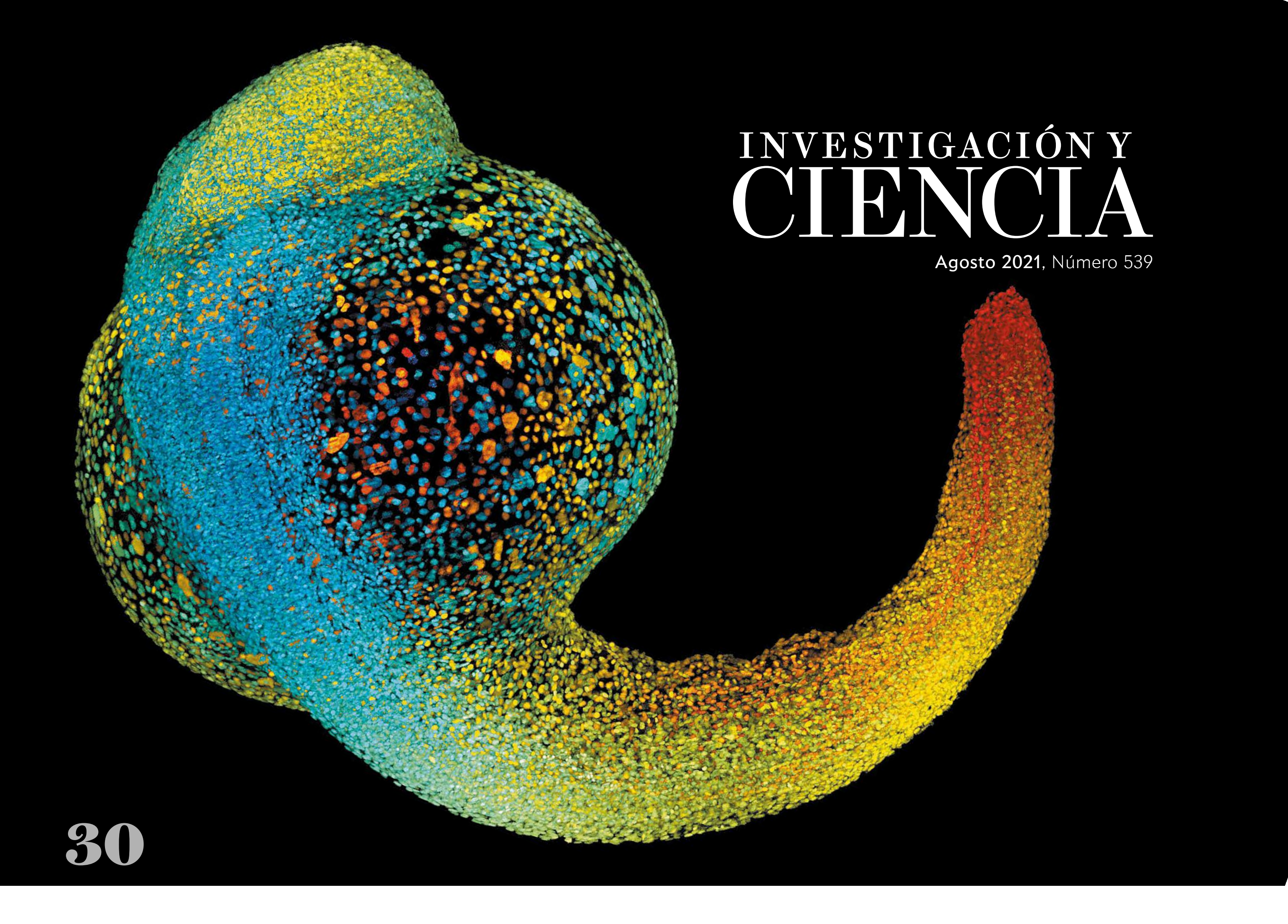
Ciertos hongos se están erigiendo entre los microbios más mortíferos del planeta

FÍSICA
La física cuántica reescribe el concepto de causalidad

MEDIOAMBIENTE
Economías alternativas para un mundo sostenible

BIOLOGÍA
Las fuerzas mecánicas moldean el desarollo celular





PHILIPP KELLER/HHMI JANELIA RESEARCH CAMPUS

ARTÍCULOS


8


58


88

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



La ilustración por ordenador representa el hongo *Aspergillus fumigatus*, una especie común en la naturaleza, en especial en la hojarasca en descomposición de los suelos. Pero en medicina se lo conoce porque causa graves trastornos a las personas con el sistema inmunitario debilitado o con otras enfermedades pulmonares. Además, puede propagarse al cerebro, los riñones, el hígado y la piel. Ilustración de Katernyna Kon, Science Source.

redaccion@investigacionyciencia.es



Junio 2021

MUONES Y QUARKS

En «El misterio del muón» [Investigación y Ciencia, junio de 2021], Lucius Bushnaq, Gregorio Herdoíza y Marina Krstić Marinković explican que la técnica conocida como cromodinámica cuántica en el retículo proporciona un método alternativo para realizar cálculos en física de partículas. Dicho método se basa en considerar el espacio y el tiempo como formados por «píxeles» discretos. Durante el cálculo, el tamaño del píxel se mantiene finito, pero luego el resultado físico se obtiene tomando una extrapolación en la que las dimensiones del píxel tienden a cero y, por tanto, el número total de píxeles tiende a infinito.

Tengo formación en matemáticas, por lo que no puedo evitar la pregunta: ¿está dicho límite siempre bien definido? En otras palabras, ¿podemos confiar en el resultado de esa extrapolación? Si hay sutilezas a la hora de tomar ese límite, ¿podrían explicar la diferencia entre los resultados obtenidos mediante la técnica del retículo y el método guiado por datos? Si no, ¿cuáles son en estos momentos las principales hipótesis para explicar la sorprendente diferencia entre los resultados de ambos cálculos?

Rodrigo Gil
Madrid

Responden los autores: *Una de las características más importantes de la cromodinámica cuántica es que su constante de acoplamiento (el parámetro del modelo estándar que cuantifica la intensidad de la interacción entre gluones y quarks) disminuye a medida que la energía aumenta. Esta propiedad se conoce como libertad asintótica e implica que, en el límite de energías infinitamente grandes —o, de manera equivalente, distancias infinitamente pequeñas—, los quarks y los gluones no interaccionan entre sí; es decir, se comportan como si fueran partículas libres. Así pues, la libertad asintótica exige que la constante de acoplamiento desaparezca cuando el espaciado del retículo tiende a cero, y esta propiedad garantiza a su vez la existencia del límite continuo. No obstante, para asegurar que en dicho límite los resultados coinciden con las predicciones de la cromodinámica cuántica, la extrapolación debe hacerse de cierta manera; en concreto, manteniendo constantes todas las escalas físicas relevantes, como las masas de los quarks y el volumen del retículo.*

En el cálculo de la colaboración Budapest-Marsella-Wuppertal (BMW) sobre la contribución de la polarización del vacío al momento magnético del muon, la mayor fuente de incertidumbre proviene precisamente de dicha extrapolación. Entre otras razones, se encuentra relacionada con varios efectos sutiles asociados a la formulación concreta escogida por los autores para describir los quarks en el retículo.

> «¿Cuáles son las principales hipótesis para explicar la sorprendente diferencia entre ambos cálculos?»
> —*Rodrigo Gil (Madrid)*

El origen de la discrepancia entre ambos tipos de cálculo no ha sido identificado aún. Con todo, hay buenas perspectivas para resolver este enigma en un futuro próximo. Por un lado, varios grupos que efectúan cálculos en el retículo ya están trabajando para conseguir una precisión similar a la lograda por la colaboración BMW, y algunos de esos trabajos se basan en formulaciones diferentes a la adoptada por BMW e incluirán simulaciones con espaciados de red más pequeños. Por otro, el método guiado por datos se beneficiará de nuevos análisis y resultados experimentales. El objetivo principal es aclarar cierta discrepancia entre las dos mediciones experimentales más precisas en la región dominante de bajas energías. Por último, el futuro experimento MUonE del CERN debería proporcionar una medición totalmente independiente de la contribución de la polarización del vacío al momento magnético del muon. La resolución de este rompecabezas es una condición esencial para consolidar la predicción del modelo estándar ante las nuevas mediciones del momento magnético que obtendrán los experimentos del Fermilab y del laboratorio japonés J-PARC.

AZARA INGENIERO

El artículo de José Luis Tellería «Félix de Azara y la conservación de la naturaleza en América» [Investigación y Ciencia, junio de 2021] lleva por subtítulo «A finales del siglo xviii, el militar naturalista describió el impacto de la destrucción del hábitat, la sobrecaza y la llegada de especies exóticas en la biodiversidad de la América colonial». Esta redacción oculta que Félix de Azara era, en realidad, ingeniero. Ser militar era obligado, puesto que la única escuela de ingeniería que había en el Reino de España en aquel entonces era la Real Academia de Matemáticas de Barcelona, de carácter militar y que en 2020 celebró su tricentenario como una de las primeras escuelas de ingeniería de Europa.

Citarlo como militar es correcto pero engañoso, puesto que Azara fue al Virreinato del Río de la Plata en virtud de su oficio para realizar tareas relacionadas con su profesión. Esto sería equivalente a citar a Francisco Javier Balmis, que a principios del siglo xix encabezó la expedición de la vacuna contra la viruela, como militar sanitario en lugar de como cirujano y médico. Creo que, aunque en el artículo sí se habla de su profesión, el subtítulo resulta desacertado.

Francisco Luis García Ahumada
Madrid

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.


F = m x a
E = m c 2
p = F / a
p = F / a
m x v
W = m x g
m x g
...
s = v x t
p = m x v
E =
...
W = F x s

NEUROCIENCIA

Escribir con el pensamiento

Un nuevo implante de inteligencia artificial convierte en texto las letras pensadas

Cada vez que alguien se mueve, percibe, habla o hace cualquier otra cosa, el cerebro genera un patrón específico de actividad eléctrica. Desde hace décadas los científicos captan esos impulsos a través de instrumentos con el fin de conocer mejor las enfermedades cerebrales y ayudar a las personas con discapacidad. Las interfaces cerebro-ordenador en desarrollo pueden restaurar la motricidad de algunas personas afectadas por parálisis, y en este momento se trabaja en su aplicación como tratamiento de trastornos neurológicos y psiquiátricos.

Sin embargo, la próxima generación de interfaces podría ser algo parecido a escribir un mensaje de texto. Un nuevo estudio publicado en *Nature* describe un implante cerebral que permitiría a quienes han perdido la movilidad de los brazos escribir con el pensamiento, sin mediación de las manos.

Los autores del estudio combinaron un programa de inteligencia artificial con la implantación de electrodos en el cerebro de un paciente tetrapléjico. A este se le pidió que imaginase que estaba escribiendo a mano, y la interfaz transformó las letras y las palabras pensadas en texto visible en la pantalla del ordenador.

Esta técnica podría beneficiar a millones de personas de todo el mundo que han sufrido lesiones en las extremidades superiores o en los músculos vocales que les privan de la capacidad de escribir o hablar.

Los trabajos previos de una de las autoras, Krishna V. Shenoy, de la Universidad Stanford, han ayudado a analizar los patrones neurales asociados con el habla. Sus programas también han descodificado los movimientos imaginarios del brazo, de modo que las personas con parálisis son capaces de mover el cursor sobre un teclado virtual visible en la pantalla para elegir y pulsar las letras. Ahora bien, esta técnica solo permite alcanzar las 40 pulsaciones por minuto, mucho menos que la velocidad media, cercana a 190. En la investigación reciente se ha logrado acelerar la comunicación con la escritura a mano imaginaria. Con la nueva técnica, el participante del estudio, en aquel momento de 65 años, alcanzó mentalmente las 90 pulsaciones por minuto. Tal velocidad se acerca a la media de los escritores más veteranos,

JONATHON ROSEN

que suelen teclear unos 115 caracteres por minuto en el teléfono.

«Esta línea de trabajo podría ayudar a restaurar la comunicación de las personas con parálisis grave o con síndrome de enclaustramiento», afirma Frank Willett, autor principal del artículo e investigador del Laboratorio Traslacional de Neuroprotésica en Stanford. «Es fascinante, porque permitirá a las personas a expresarse y compartir sus pensamientos.»

El participante del estudio había sufrido una lesión medular en 2007 que le había dejado prácticamente inmovilizado del cuello hacia abajo. En 2016, el neurocirujano de Stanford Jaimie Henderson, otro de los autores del artículo, implantó dos pequeños chips de interfaces en el cerebro de este paciente. Cada uno contiene 100 electrodos que perciben la actividad neuronal. Se le implantaron en una región de la corteza motora que controla los movimientos de la mano y del brazo, lo que permitió perfilar los patrones de actividad cerebral asociados con el lenguaje escrito.

«El estudio supone, sin duda, un avance importante en el campo de las interfaces cerebro-ordenador intracorticales», opina la bioingeniera de la Universidad de Washington Amy L. Orsborn, ajena a este. «Una razón evidente de ello es que han logrado un avance enorme en una tarea difícil pero importante como es el tecleado. También supone la mejor demostración hasta la fecha del aprovechamiento de herramientas de aprendizaje automático ya disponibles, como son los modelos predictivos del lenguaje, como medio para mejorar las interfaces.»

A Mijail D. Serruya, neurólogo de la Universidad Thomas Jefferson que estudia las interfaces en la recuperación del ictus pero no ha participado en el estudio, le ha impresionado el trabajo. «Vi por primera vez la presentación de esta investigación en 2019 y creo que es estupenda. Demuestra a las claras que es posible descodificar esas trayectorias de motricidad fina a partir de la actividad neocortical.»

Serruya añade que su propia investigación puede alinearse con la de Willett para ayudar a las personas que han sufrido traumatismos encefálicos o ictus. «Hemos comprobado que las señales de control motriz pueden ser descodificadas [después de un ictus], lo que significa que algunas de las estrategias de descodificación elaboradas por Willett podrían tener aplicaciones en otros enfermos que no han sufrido lesiones medulares», asegura.

Aun así, plantea una pregunta sobre la nueva investigación, una duda que ya expuso a Willett hace unos años: aunque restaurar la comunicación a través de las letras escritas es lógico, podría no ser el modo más eficaz de hacerlo. «¿Por qué no enseñar un nuevo lenguaje basado en gestos elementales más simples, similar a las teclas del taquígrafo o al lenguaje de signos?», se pregunta Serruya. «Ello aceleraría la velocidad de comunicación y, sobre todo, reduciría el esfuerzo mental y la atención que demanda.»

Por ahora, Willett está centrado en la descodificación mental de formas más habituales de comunicación, y pretende repetir el experimento de tecleado, esta vez con más personas paralíticas. Traducir el control cerebral sobre la escritura manual puede ser un primer paso importante en la restitución de la capacidad de comunicación, explica. Pero descodificar el habla real mediante el análisis de lo que se intenta decir sigue siendo un gran reto, pues el ser humano habla con más rapidez que con la que escribe o teclea.

«Descodificar el habla con la precisión y la riqueza de vocabulario suficiente para que la gente pueda mantener una conversación general resulta muy complejo. La relación entre señal y ruido es mucho mayor, por lo que es más difícil trasladarlo al ordenador», aclara Willet. «Pero ahora estamos entusiasmados con las posibilidades que abre la descodificación de la escritura a mano con semejante precisión. Cada letra evoca un patrón distintivo de actividad neural.»

Cuando se le pregunta cuándo podría estar lista la técnica descodificadora de escritura y habla, Willett se muestra optimista pero prudente. «Es difícil predecir en qué momento nuestro método se transformará en un aparato comercializable. Algunas empresas ya están trabajando en interfaces implantables, pero nunca se sabe cuándo se dará el gran paso. ¡Espero que sea en el plazo de unos años, no de décadas!», concluye.

—*Bret Stetka*

Erratum corrige

En el extracto **Un pozo de gas en el jardín trasero** de la sección «Hace 50, 100 y 150 años» [por Mark Fischetti; Investigación y Ciencia, julio de 2021], se describe que «los incendios podían iniciarse en cualquier momento» en las habitaciones, cuando debería decir que «el fuego podía encenderse en cualquier momento». Agradecemos a nuestro lector Paco Escribá por habérnoslo advertido.

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

ASTROBIOLOGÍA

¿Hay vida en el subsuelo de Marte?

La radiación subterránea podría haber promovido la vida microbiana en el planeta rojo

A grandes profundidades bajo la superficie terrestre, los elementos radiactivos descomponen las moléculas de agua y generan sustancias capaces de favorecer la vida subterránea. Este proceso, conocido como radiólisis, ha permitido que las bacterias proliferen en las grietas y poros inundados de las rocas de nuestro planeta. Ahora, un estudio publicado en *Astrobiology* sostiene que el mismo proceso podría haber promovido la vida microbiana en el subsuelo de Marte.

Las tormentas de polvo, los rayos cósmicos y los vientos solares asolan la superficie del planeta rojo. Sin embargo, algunas formas de vida podrían haber hallado refugio bajo ella. «El entorno de Marte con más opciones de resultar habitable es el

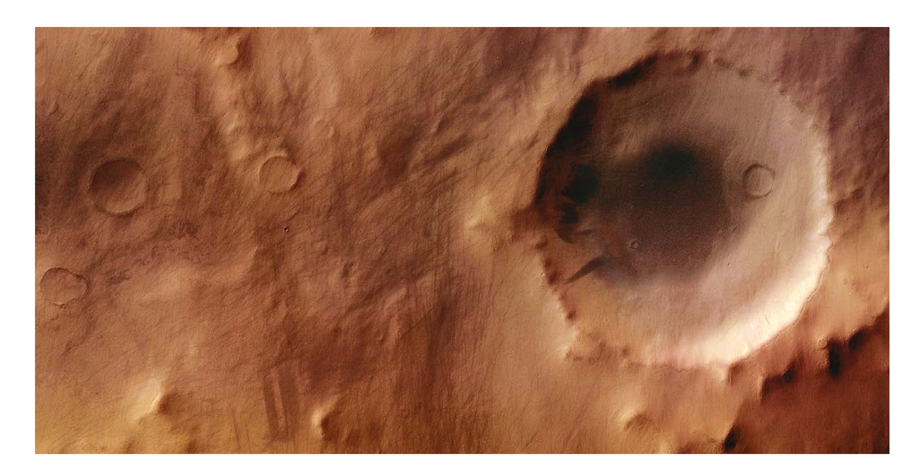
GEOLOGÍA

Joyas históricas

Los diamantes imperfectos revelan el pasado de la Tierra

Los llamados «diamantes fibrosos», turbios y amarillentos, resultan demasiado antiestéticos para la mayoría de los joyeros. Sin embargo, su estructura cristalina guarda valiosos secretos sobre la historia de nuestro planeta.

Yaakov Weiss, geólogo de la Universidad Hebrea de Jerusalén, y sus colaboradores trituraron varios diamantes fibrosos de Sudáfrica para extraer las pequeñas bolsas de líquido atrapadas en su interior. Este fluido, a partir del cual se formaron los diamantes, constituye un registro único de las condiciones que imperaban antaño en las profundidades de la Tierra. Contiene además uranio y torio, los cuales se desintegran con el tiempo en helio-4. Este va escapando poco a poco de la red cristalina del diamante, pero hasta ahora se ignoraba a qué ritmo lo hacía; un dato imprescindible para determinar la edad de estas joyas y deducir su historia.



subsuelo», señala Jesse Tarnas, planetólogo del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA y autor principal del nuevo trabajo. Por ello, examinar el subsuelo marciano tal vez ayude a descubrir si la vida pudo haber prosperado allí. Y, para averiguarlo, las mejores muestras disponibles son los meteoritos procedentes del planeta rojo.

Tarnas y sus colaboradores evaluaron el tamaño de los granos, la composición mineral y la abundancia de elementos radiactivos de varios de esos meteoritos. También calcularon la porosidad de la corteza marciana a partir de los datos de satélites y vehículos exploradores. Después introdujeron esos atributos en un modelo informático que simulaba la radiólisis para determinar la eficacia con que dicho proceso habría generado hidrógeno gaseoso y sulfatos, sustancias que pueden impulsar el metabolismo de las bacterias subterráneas. Según los autores, en presencia de agua, la radiólisis podría haber mantenido comunidades microbianas en el subsuelo marciano durante miles de millones de años. Y, de hecho, puede que siga haciéndolo hoy en día.

Los científicos ya habían estudiado la radiólisis de Marte, pero este es el primer cálculo que emplea rocas marcianas para cuantificar la habitabilidad del subsuelo. Tarnas y su equipo evaluaron también la posible riqueza de la vida subterránea y hallaron que podrían existir hasta un millón de microbios por kilogramo de roca; una densidad similar a la encontrada bajo la superficie terrestre.

De las muestras de meteoritos analizadas, las «más habitables» parecían estar compuestas por un tipo de roca conocida como brecha regolítica. «Se cree que esos meteoritos proceden de las tierras altas del sur de Marte, el terreno más antiguo del planeta», explica Tarnas.

La vida subterránea que describen los autores requeriría agua, pero aún se desconoce si esta existe o no en el subsuelo de Marte, apunta Lujendra Ojha, planetólogo de la Universidad Rutgers que no tomó parte en el estudio. Determinar si la corteza marciana contiene agua constituirá un paso importante, y esta investigación contribuye a motivar dicha búsqueda, asegura Ojha. «Donde haya agua subterránea, podría haber vida», concluye el experto.

—*Nikk Ogasa*

Weiss y su equipo modelizaron esa desintegración y estimaron cuánto helio-4 pudo escapar a lo largo del tiempo. Gracias a ello, lograron determinar amplios intervalos de edad para las piedras. Luego descartaron aquellas edades que resultaban incompatibles con lo que ya se sabe acerca de las condiciones tectónicas y térmicas del manto y la corteza en el lugar donde se formaron los diamantes. Al combinar esos datos, los investigadores obtuvieron un límite superior para la pérdida de helio, el cual pudieron aplicar a todos los diamantes fibrosos del estudio. Sus resultados se publican en *Nature Communications*.

Los autores determinaron que el fluido correspondía a tres períodos distintos, cada uno de los cuales coincidió con grandes cambios en la superficie terrestre. Los diamantes más antiguos tendrían entre 750 y 2600 millones de años de antigüedad. Gracias a pruebas adicionales, los científicos acotaron su creación en hace unos 1000 millones de años, cuando las fuerzas tectónicas levantaron escarpadas montañas en lo que hoy es Sudáfrica. Las siguientes piedras más antiguas surgieron hace entre 300 y 540 millones de años, una época que coincide con la formación de las montañas Naukluft, en Namibia. Y las más recientes se constituyeron hace entre 85 y 118 millones de años, justo antes de que una erupción subterránea las lanzara a la parte superior de la corteza.

Además, el fluido de los diamantes más viejos era rico en carbono, el de los siguientes más antiguos poseía grandes cantidades de sílice, y el de los más recientes era muy salino. Eso también podría reflejar cambios geológicos importantes; por ejemplo, los líquidos más jóvenes podrían provenir de la corteza oceánica que se hunde bajo la continental en las zonas de subducción.

Ninguna otra roca o mineral de las profundidades de la Tierra llega a la superficie con tan pocas alteraciones internas como los diamantes, asegura Suzette Timmerman, geóloga de la Universidad de Alberta que no participó en el estudio. Como consecuencia, esos fluidos ofrecen una rara ventana directa a la litosfera profunda y al manto superior. «Lo que contienen es básicamente una cápsula del tiempo», afirma Timmerman.



Los diamantes fibrosos (*fotografía*) contienen pequeñas bolsas de fluido con valiosa información geológica.

Los investigadores pretenden estudiar los diamantes de otras regiones en busca de correlaciones similares entre su formación y los grandes eventos superficiales, detalla Weiss. «Tendremos que pensar en qué nos dice esto sobre la evolución del manto y de la litosfera.»

—*Stephanie Pappas*

ESA, CENTRO AEROESPACIAL ALEMÁN, UNIVERSIDAD LIBRE DE BERLÍN Y G. NEUKUM (CC BY-SA 3.0 IGO) (*Marte*); YAAKOV WEISS (*diamante*)



EVOLUCIÓN

Diversidad de ojos

La fotografía científica revela la enorme variedad de formas de este órgano en el reino animal

Los primeros ojos surgieron hace más de 500 millones de años, justo antes del episodio de diversificación biológica conocido como la explosión del Cámbrico. Entre las primeras versiones debieron figurar el ocelo, una rudimentaria mancha de tejido fotodetector, y el ojo en copa, una simple invaginación tapizada de fotorreceptores. Con el tiempo aparecerían el cristalino y la córnea, que refractan y concentran los rayos de luz. Esto supuso un gran avance para los animales que colonizaron la tierra firme, pues transformó una cubierta protectora en un elemento óptico en sí mismo.

Algunos seres vivos no evolucionaron más y conservan esos órganos rudimentarios; los platelmintos y los moluscos actuales, por ejemplo, todavía poseen sencillos ojos en copa. En cambio, otros han desarrollado componentes especulares, una dinámica pupilar elaborada y hasta configuraciones que permiten ver al mismo tiempo por encima y por debajo del agua. Incluso algunos animales que no dependen de la vista como sentido principal conservan atributos increíbles.

1 **Pez de cuatro ojos** (*Anableps*): este pez posee ojos bilobulados. Cuando nada a flor de agua, un lóbulo permanece sumergido y el otro sobresale por encima, atento ante bocados a flote.

2 **Geco musgoso de Nueva Caledonia** (*Mniarogekko chahoua*): con hasta 35 centímetros de largo, es la mayor especie de geco conocida. Como algunos de sus parientes nocturnos, se lame con frecuencia los ojos para mantenerlos limpios.

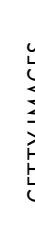
PALLY, ALAMY STOCK PHOTO (1); NATURE PICTURE LIBRARY Y ALAMY STOCK PHOTO (2); STEVE BLOOM IMAGES ALAMY STOCK PHOTO (3); DAVID FLEETHAM, ALAMY STOCK PHOTO (4)





3 **Elefante indio:** las disecciones de los globos oculares de elefantes africanos y asiáticos revelan que estos colosos probablemente sufren daltonismo, igual que algunas personas. Eso significa que no diferencian bien el rojo y el verde a la luz del día.

4 ***Venera Pedum spondyloideum:*** a diferencia de la mayoría de los animales, los ojos de este molusco (*en la imagen se aprecian 11*) carecen de cristalino para enfocar la luz. En su lugar, recurren a cristales reflectores (también presentes en las escamas de la carpa o en la piel del camaleón) para concentrar y canalizar los rayos. —*Leslie Nemo*


GETTY IMAGES

SALUD PÚBLICA

Fragancia antimosquitos

Descifrado el secreto de un repelente natural de estos insectos

Las enfermedades transmitidas por los mosquitos matan a cerca de 700.000 personas cada año, de modo que es posible salvar vidas con la aplicación de repelentes. Uno de ellos es el piretro, extracto de la flor del pelitre de Dalmacia (*Tanacetum cinerariaefolium*) que viene usándose desde hace milenios. Un nuevo estudio publicado en *Nature Communications* revela al fin el mecanismo de acción del piretro, basado en dos componentes que actúan sinérgicamente para disuadir a estos molestos intrusos.

Ke Dong, neurotoxicóloga de la Universidad Duke y coautora del estudio, señala que los mosquitos suelen adquirir resistencia a los repelentes con el tiempo, por eso «hay que andar siempre en busca de alternativas que sustituyan las disponibles». Y conocer los mecanismos de acción de los repelentes ayudaría. «Por fin comenzamos a saber cómo un repelente natural que se usa en todo el mundo impide que los mosquitos piquen, y eso es una gran noticia.»

Dong y sus colaboradores fijaron minúsculos electrodos a las quetas, o pelos, de las antenas de los mosquitos para observar los efectos del piretro. De ese modo midieron la reacción de los insectos a los repelentes, al nivel mismo de los distintos receptores olfativos ubicados en las neuronas. Numerosos tipos de mosquitos que son vectores de enfermedades poseen más de un centenar de ellos, pero los autores descubrieron que el piretro activa un receptor en concreto, el Or31, y comprobaron que la sustancia no ahuyenta a los mosquitos que han sido privados de ese receptor mediante técnicas de genomodificación.

Dong explica que, a diferencia de muchos otros receptores olfativos, el Or31 parece ser exclusivo de los mosquitos patógenos. Además, numerosos repelentes naturales —pero no el piretro— actúan activando varios receptores olfativos, y todavía se sabe muy poco sobre el modo en que operan esos otros receptores. En vista de todos estos factores, los científicos plantean la posibilidad de que el Or31 pudiera servir como diana universal para la creación de repelentes más eficaces.

El equipo también recurrió al análisis químico para determinar el modo en que dos componentes moleculares del piretro, el E-beta-farneseno (EBF) y la piretrina, desencadenan la respuesta de repulsión. Los experimentos con mosquitos vivos enseñan que ambos funcionan mejor combinados: el EBF activa el Or31 y las piretrinas potencian la acción repelente al intensificar la transmisión nerviosa.

Dong y sus colaboradores planean investigar los circuitos nerviosos que explican la acción repelente del piretro y de otras sustancias naturales parecidas. También seguirán ensayando otros posibles repelentes, como el componente principal del aceite de citronela, que también activa el Or31.


El pelitre dálmata produce un potente repelente.

Christopher Potter, neurocientífico de la Universidad Johns Hopkins y especialista en el olfato de los insectos, ajeno al estudio, afirma que los hallazgos tal vez sirvan algún día para crear «superrepelentes». A su juicio, averiguar exactamente de qué neuronas depende la respuesta de los mosquitos a ciertos olores podría revelar nuevos modos de modificar su comportamiento. «Quizá un día descubramos cómo agudizar aún más ese dial o cómo engañarlo para provocar aversión a otros olores, como los que normalmente les atraen hacia nosotros.»

—*Rachel Nuwer*

SALUD

¿Infección vírica o bacteriana?

Un nuevo análisis de sangre brinda respuestas a una duda recurrente de los médicos

Mucosidad, tos y fiebre son los síntomas clásicos que presentan los pacientes con infección respiratoria que acuden cada día a las consultas. ¿Pero el culpable es una bacteria, vulnerable a los antibióticos, o un virus, más difícil de tratar con medicación? A menudo el médico no está seguro. Un grupo de investigadores asegura que está cerca de lograr una prueba fiable y rápida, que resolvería la duda en la misma consulta.

Ante una infección desconocida, los médicos a veces ordenan pruebas de laboratorio específicas para las bacterias más comunes, como *Streptococcus*, o bien prueban de inmediato con antibióticos, una decisión que basan simplemente en la intensidad de los síntomas —aunque su uso excesivo provoca la aparición de peligrosas cepas bacterianas que son resistentes a ellos—. «Si pudiésemos saberlo con rapidez, se pondría fin a la prescripción incorrecta de antibióticos», afirma Ephraim Tsalik, especialista en enfermedades infecciosas de la Universidad Duke. En 2016, él y sus colaboradores crearon una prueba de laboratorio que relaciona los síntomas respiratorios más frecuentes con la etiología vírica, bacteriana o no infecciosa. Cada microbio patógeno activa un conjunto distinto de genes que dan lugar a la producción de ARN o proteínas, y la prueba detecta esas reveladoras firmas de «expresión génica» en una pequeña muestra de sangre.

El equipo ha emprendido recientemente una colaboración con la empresa BioFire para abreviar la duración de la prueba, de modo que el resultado esté listo en menos de una hora. El nuevo proceso, sometido a ensayo en más de 600 pacientes atendidos en urgencias en el marco de un estudio publicado en *Critical Care Medicine*, detectó las infecciones bacterianas con una precisión del 80 por ciento, y las víricas, con valores cercanos al 87 por ciento. Otra prueba habitual evaluada por Tsalik mostró una precisión cercana al 69 por ciento. Y aún otras exigen un largo cultivo o solo permiten confirmar patógenos que el médico ha elegido de antemano, guiado por su experiencia o intuición.

La tecnología que examina la respuesta de los genes frente a los patógenos de un modo rápido e integral está en pañales, afirma Pur-

BOTÁNICA

El estudio sesgado de las plantas

Los investigadores se interesan por las más altas, radiantes y vistosas

Botánicos y jardineros por igual parecen ser incapaces de resistirse al encanto de una flor llamativa o de un porte alto. Un original estudio ha descubierto que la investigación botánica se inclina irremediablemente hacia las plantas vistosas en detrimento de las apagadas, monótonas y rastreras, que quedan marginadas por muy amenazadas que estén.

Publicado en *Nature Plants*, en el análisis se revisan 280 estudios efectuados entre 1975 y 2020 con 113 especies botánicas de los Alpes sudoccidentales, una región de rica biodiversidad. Los investigadores recopilaron datos sobre la morfología (rasgos como el tamaño y el color), la ecología y la rareza de cada una. Gran número de estudios realizados con cada planta indican que las más llamativas atraen mucho más la atención de los especialistas.





Una planta muy estudiada (*izquierda*) y otra poco conocida (*derecha*) de los Alpes sudoccidentales.

Las plantas con flores azules, en tonos que van del índigo al cian, han sido estudiadas de forma desproporcionada, puesto que el azul es uno de los colores florales menos comunes, afirma el autor principal del estudio, Martino Adamo, biólogo de la Universidad de Turín. Las plantas de flores rojas, rosadas o blancas superan ampliamente a las provistas de flores marrones o verdes, y las plantas con tallos altos también sobresalen más, no solo literalmente.

«Nuestros resultados no dicen tanto que los investigadores presten mayor atención a las plantas más bonitas, sino que escogen las más conspicuas, las más fáciles de localizar y las de flores coloridas», afirma Adamo.

El equipo esperaba encontrar más especies amenazadas entre las más estudiadas, pero no fue así. Este resultado ilógico podría tener consecuencias importantes para la ciencia vegetal, según los autores. El sesgo hacia las plantas «atractivas» podría significar que «podríamos estarnos perdiendo ejemplos extraordinarios y desconocidos de la historia natural de algunos vegetales», opina el coautor del estudio Kingsley Dixon,

THOMAS FUCHS (*ilustración*); MARTINO ADAMO (*plantas*)

vesh Khatri, inmunólogo computacional de la Universidad Stanford que no ha participado en el estudio. La amplificación del ARN con métodos de PCR, un paso clave del análisis, es ahora solo cuestión de 15 o 20 minutos. Khatri es socio fundador de Inflammatix, empresa que prevé lanzar pronto una prueba rápida «que indicará si se trata de una infección y qué patógeno es el responsable probable, amén de información sobre la gravedad.»

Cualquier herramienta que contribuya a moderar el uso de los antibióticos en las infecciones respiratorias «puede tener una gran repercusión en la contención de la resistencia microbiana», afirma Gregory Storch, infectólogo pediátrico de la Universidad Washington en San Luis, ajeno al estudio. Y si bien las personas de distinta procedencia y con ciertas enfermedades previas pueden mostrar patrones variados de expresión génica, Storch espera que en el futuro esas diferencias se tengan en cuenta para garantizar resultados fiables para todos.

—Harini Barath

botánico de la Universidad John Curtin, en Australia. «Además, podríamos estar dejando de lado especies en rápido declive, abocadas a la extinción, de las que ni siquiera contamos con información básica en los bancos de semillas que nos ayude a la conservación.»

Adamo añade: «Estas conclusiones indican que probablemente nuestro subconsciente es más influyente de lo esperado a la hora de elegir los modelos de estudio; no es una tragedia, pero debemos ser conscientes de ello» cuando planifiquemos la labor futura. Los resultados reflejan las observaciones en otras disciplinas: los mamíferos y las aves de colores vistosos y los más carismáticos y queridos también acaparan las campañas de conservación y obtención de fondos, sean escasos o no.

Kathryn Williams, investigadora en psicología ambiental de la Universidad de Melbourne que no ha participado en el estudio, sostiene que las posibles consecuencias de tales sesgos «revisten importancia para la conservación vegetal y la toma de decisiones en temas ambientales en general. Disponer de datos sólidos sobre las especies ayudará en las decisiones difíciles que han de tomarse a la hora de dirigir los esfuerzos y asignar los fondos destinados a la conservación», añade.

—Jillian Kramer

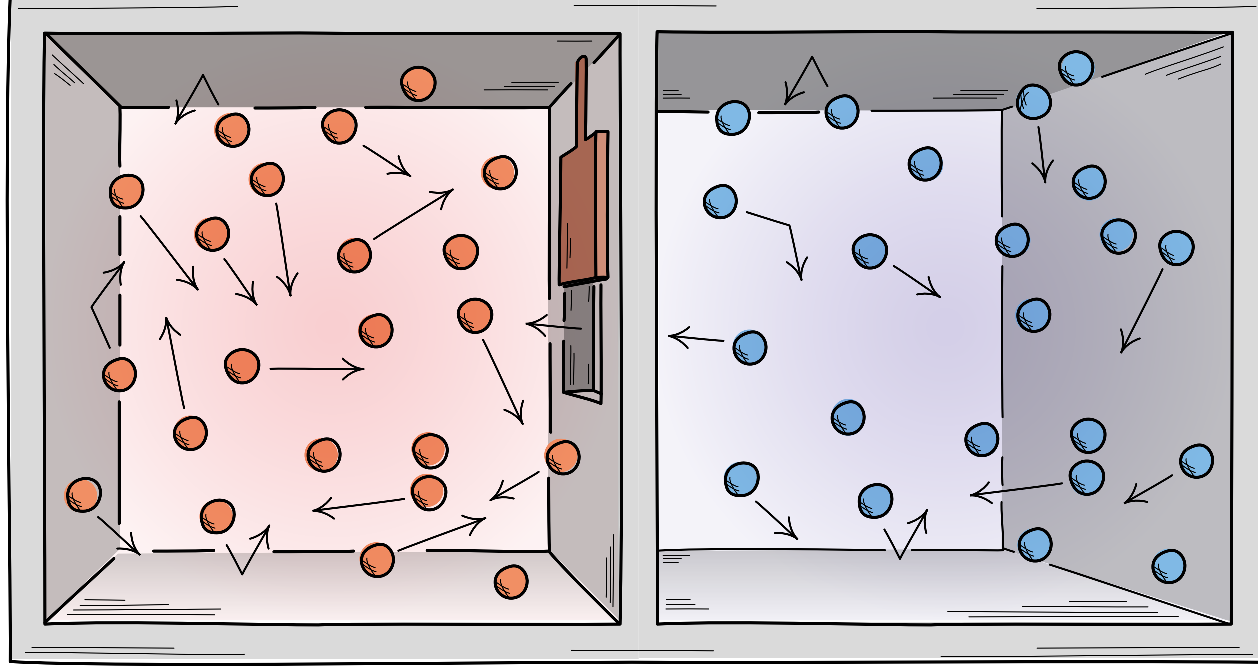
TERMODINÁMICA

Un nuevo demonio de Maxwell

Una estrategia empleada en los juegos de azar permite llevar al laboratorio una versión mejorada del famoso experimento mental del siglo XIX

GONZALO MANZANO PAULE





EN 1867, JAMES CLERK MAXWELL argumentó que un pequeño ser que conociese las posiciones y velocidades de las moléculas de un gas separado en dos cámaras podría violar la segunda ley de la termodinámica accionando una pequeña compuerta. Un trabajo reciente ha conseguido emular dicho proceso minimizando el control que es necesario ejercer sobre el sistema.

Las leyes de la termodinámica nos ayudan a entender por qué una bebida fresca pierde rápidamente su atractivo si se deja al sol en un día de verano, o por qué el motor de un coche necesita una diferencia de temperatura para funcionar. La primera ley establece que la energía se conserva en todos los procesos físicos. La segunda nos dice qué transformaciones de energía son posibles y cuáles no a través del concepto de entropía: solo los procesos que tienden a aumentar la entropía total del universo suceden espontáneamente. Por ejemplo, la segunda ley establece que el calor fluirá de manera natural de un cuerpo caliente a uno frío, y que ese flujo solo podrá invertirse a condición de gastar algún otro recurso termodinámico. Así sucede con el refrigerador de nuestra casa, cuyo coste termodinámico nos llega a final de mes en forma de factura de la luz.

Sin embargo, mucho ha llovido desde la formulación original de estas leyes en

el siglo XIX. Si la termodinámica nació para describir el funcionamiento de grandes artefactos, como la máquina de vapor, hoy es posible estudiar el intercambio de energía en objetos de tamaño micrométrico o incluso nanométrico. La disciplina que estudia estos procesos se conoce como termodinámica estocástica, y un ejemplo de su ámbito de aplicación son los motores moleculares que, en nuestro cuerpo, se encargan de funciones tan relevantes como la contracción muscular o el transporte intracelular. Otra área emergente, la termodinámica cuántica, es capaz de describir la operación de motores térmicos a escalas aún menores y donde intervienen algunos fenómenos intrínsecamente cuánticos, como el entrelazamiento.

De hecho, una mirada microscópica revela que algunas de las limitaciones impuestas por las leyes de la termodinámica son en realidad menos estrictas de lo que parecían. Uno de los primeros en intuir este fenómeno fue James Clerk Maxwell, quien en 1867 propuso un experimento mental en el que un pequeño ser inteligente, posteriormente denominado «demonio», podría violar la segunda ley reordenando las moléculas de un gas. Décadas más tarde, y fascinado por la idea de Maxwell, el físico e inventor Leó Szilárd propuso un hipotético motor que podría emplear información para generar trabajo. Más de un siglo después, el desarrollo de estas ideas ha desembocado en un fructífero marco teórico en el que energía e información se hallan estrechamente relacionadas y que ha permitido analizar en el laboratorio las ideas de Maxwell y Szilárd.

En un trabajo reciente, realizado junto con investigadores del Centro Internacional de Física Teórica (ICTP) de Trieste y la Universidad de Aalto en Helsinki, hemos intentado llevar este marco hasta sus límites mediante un nuevo tipo de demonio. Este emplea estrategias similares a las usadas en finanzas y en algunos juegos de azar y las aprovecha para extraer trabajo, lo que aparentemente le permite violar la segunda ley. No obstante, una característica de este «demonio tahúr» que lo diferencia de las propuestas anteriores es que, para operar, no necesita ejercer un control del sistema a nivel microscópico. Antes bien, y como todo buen jugador, solo debe saber cuándo parar el juego, una propiedad que lo hace potencialmente aplicable a muchas más situaciones que el demonio original de Maxwell.

Demonios e información

Para entender este salto conceptual debemos detenernos un momento a explicar el experimento mental de Maxwell. Imaginemos una cámara con un gas separada por una pared en dos compartimentos, cada uno de los cuales se mantiene a una temperatura distinta. Por término medio, las moléculas del lado caliente se moverán más rápido que las del lado frío, y viceversa. Sin embargo, no todas las moléculas de cada cámara se desplazarán a la misma velocidad.

Ahora imaginemos una pequeña compuerta en la pared que separa los compartimentos, la cual está controlada por un pequeño ser —el demonio— capaz de abrirla o cerrarla a voluntad. Cuando las moléculas más rápidas del gas frío se aproximan a la compuerta, el demonio la abre y las deja pasar al otro lado. De igual modo, permite pasar también al otro lado las moléculas más lentas del gas caliente. De esta manera, el gas frío se enfriará aún más, mientras que el caliente aumentará su temperatura. Dado que el demonio no tiene por qué realizar ningún trabajo apreciable al abrir y cerrar la pequeña compuerta (puede hacerlo de manera conservativa), este proceso parece violar la segunda ley de la termodinámica.

La solución a esta paradoja tuvo que esperar hasta bien entrado el siglo XX, cuando Claude Shannon formuló la teoría de la información y Rolf Landauer analizó la irreversibilidad de las operaciones lógicas. Siguiendo la propuesta del físico de IBM Charles Bennett, el demonio de Maxwell puede exorcizarse cuando consideramos el carácter físico de la información. ¿Cómo?

Para operar, nuestro ser necesita procesar y almacenar una cierta cantidad de información. Esta debe tener un soporte físico, ya sea en el cerebro del demonio o en el procesador de un ordenador. Y una vez que incorporamos este soporte o «memoria» a la descripción del problema, es posible ver que la disminución de la entropía del gas se ve compensada por el aumento de entropía que tiene lugar en dicha memoria. No obstante, aun resuelta la paradoja, esta conexión entre termodinámica e información introduce nuevas e interesantes posibilidades, ya que la propia memoria del demonio puede convertirse ahora en un recurso.

¿Juega el demonio a los dados?

Tanto el demonio de Maxwell como todas las variantes propuestas desde entonces se han basado en dos ingredientes: la adquisición de información sobre el comportamiento microscópico del sistema (en el ejemplo de Maxwell, la información relativa a las posiciones y velocidades de las moléculas del gas) y la capacidad de control necesaria para utilizar esa información (abrir y cerrar la compuerta a placer). Mientras que el primer ingrediente es fundamental, junto con mis colaboradores del ICTP nos preguntamos qué ocurriría si renunciásemos al segundo. ¿Seguiría siendo posible invertir el flujo de calor o extraer trabajo?

La respuesta es afirmativa, y para obtenerla hemos tenido que echar mano de las herramientas que nos brinda la termodinámica estocástica. Esta disciplina ha desarrollado una nueva concepción de la termodinámica basada en una formulación probabilística. A nivel microscópico, los procesos que disminuyen la entropía del universo pueden ocurrir, y de hecho suceden constantemente. La diferencia radica en que tales procesos son muchísimo menos frecuentes que aquellos que la aumentan. Esta visión invita a explorar la conexión entre la termodinámica y los juegos de azar.

En nuestra propuesta, el demonio actúa de manera similar a un jugador en una máquina tragaperras: invierte una cierta cantidad de trabajo para generar un proceso fuera del equilibrio («introduce monedas»), pero desea recuperar una cantidad mayor. Para ello, nuestro demonio tahúr se sirve de su buena suerte y de su pericia como jugador: observa constantemente la respuesta del sistema y, en cada momento, decide si continuar con el proceso («seguir apostando») o abandonar («recoger sus ganancias»). En términos de la configuración original de Maxwell, el demonio ya no podría controlar la compuerta, que se abriría y cerraría de una manera impredecible para él. Lo único que puede hacer es decidir si detener su movimiento o no.

Tal vez parezca imposible que algo así pudiera funcionar nunca, ya que, aunque alguna vez las moléculas llegaran a ordenarse espontáneamente tal y como desea el demonio tahúr, muchísimas otras veces el resultado será el opuesto. Y de hecho, así ocurre para numerosas estrategias de juego. Sin embargo, nuestro trabajo ha demostrado que hay estrategias ganado-

DEMONIOS DEL SIGLO XXI: Un pequeño dispositivo que deja pasar electrones entre una isla de cobre (*rojo*) y dos terminales de aluminio (*cian*) mediante el potencial aplicado en un terminal auxiliar (*verde*) permite emular el demonio de Maxwell. Sin embargo, y a diferencia del demonio original, este dispositivo puede aprovechar las fluctuaciones aleatorias del sistema para extraer trabajo sin ejercer un control microscópico sobre él. Para ello, basta con que siga una estrategia usada en los juegos de azar: detener el proceso cuando el trabajo invertido (el «dinero apostado») supera cierto umbral. Un dispositivo adicional (*azul*) permite detectar los electrones uno a uno y determinar con exactitud el momento en que el umbral de trabajo es superado en cada realización del experimento.

ras cuando la dinámica del sistema no es simétrica con respecto a la inversión temporal. En el caso de la compuerta, esto quiere decir que, si grabamos una película que muestra cómo se abre y se cierra la trampilla, y luego la comparamos con la misma película puesta marcha atrás, una y otra serán distintas.

Demonios en el laboratorio

Para ilustrar nuestra idea y verificar los resultados, nuestros colaboradores de la Universidad de Aalto propusieron utilizar un dispositivo experimental que ya habían construido y que era capaz de implementarla. Este constaba de una pequeña «isla» de cobre, la cual se ponía en contacto con dos terminales superconductores de aluminio a través de barreras de óxido. En este sistema, los electrones pueden atravesar las barreras con una cierta probabilidad debido al efecto túnel cuántico. Además, podemos aplicar un potencial electrostático sobre la isla de cobre, lo que equivale a realizar trabajo para obtener una configuración fuera del equilibrio. Al mantener el conjunto a una temperatura de 0,67 kelvin, los electrones que «saltan» dentro o fuera de la isla (intercambiando calor en el proceso) pueden detectarse uno a uno. Esto permite obtener una descripción termodinámica muy precisa del sistema con la que poner a prueba nuestras predicciones teóricas.

El potencial electrostático se aplica durante un cierto período de tiempo, durante el cual el demonio tahúr puede jugar. Si simplemente espera hasta el final, estará condenado a perder, ya que en promedio siempre habrá realizado trabajo. Para ganar, deberá adoptar alguna estrategia que le dicte cuándo parar. Nuestros resultados indican que una estrategia ganadora consiste en calcular el trabajo consumido por el potencial electrostático en tiempo real y parar el proceso en cuanto dicho trabajo supere un cierto límite. Es decir, si el demonio ve que está invirtiendo «demasiadas monedas», se retirará para evitar más perdidas. En cambio, si está extrayendo trabajo o gastando poco, dejará que el proceso continúe hasta el final. Esta simple regla permite que, por término medio, el demonio extraiga trabajo del entorno térmico. Aunque, al igual que en el ejemplo de Maxwell, el precio es el almacenamiento de la información necesaria para poder implementar dicha estrategia de juego.

Nuestro trabajo también extendió las consideraciones teóricas al caso cuántico, caracterizado por la posibilidad de tener superposiciones de estados y por el inevitable efecto que las mediciones ejercen sobre el sistema. Nuestros resultados indican que, en algunos casos, tales superposiciones podrían ser beneficiosas para el demonio. En el futuro, esperamos poder llevar a cabo un experimento similar en un régimen enteramente cuántico.

Nuestros resultados ponen de relieve nuevas maneras de utilizar información con fines energéticos y creemos que abrirán la puerta a otras estrategias «de apuesta e inversión» en sistemas termodinámicos, ya que, curiosamente, nuestro modelo comparte una base común con las matemáticas de las finanzas. Por último, además de refinar nuestro entendimiento microscópico de una de las leyes más fundamentales de la física, estos avances podrían contribuir a mejorar las propuestas actuales de motores microscópicos u otros dispositivos termoeléctricos. Asimismo, nuestra teoría provee nuevas herramientas para la investigación de procesos físicos, químicos o biológicos que ocurren a tiempos aleatorios.

Gonzalo Manzano Paule *investiga en el Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos, un centro mixto del CSIC y la Universidad de las Islas Baleares, y en el Instituto de Óptica Cuántica e Información Cuántica de Viena.*

PARA SABER MÁS

Maxwell's refrigerator: An exaclty solvable model. Dibyendu Mandal, H. T. Quan y Christopher Jarzynski en *Physical Review Letters*, vol. 111, art. 030602, julio de 2013.

Thermodynamics of information. Juan M. R. Parrondo, Jordan M. Horowitz y Takahiro Sagawa en *Nature Physics*, vol. 11, págs. 131-139, febrero de 2015.

Information: From Maxwell's demon to Landauer's eraser. Eric Lutz y Sergio Ciliberto en *Physics Today*, vol. 68, págs. 30-35, septiembre de 2015.

Thermodynamics of gambling demons. Gonzalo Manzano, et al. en *Physical Review Letters*, vol. 126, art. 080603, febrero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Demonios, motores y la segunda ley. Charles H. Bennett en *IyC*, enero de 1988.

Demonios, entropía y la búsqueda del cero absoluto. Mark G. Raizen en *IyC*, mayo de 2011.

Retrofuturismo cuántico. Nicole Yunger Halpern en *IyC*, julio de 2020.

GONZALO MANZANO, DIEGO SUBERO, OLIVIER MAILLET, ROSARIO FAZIO, JUKKA P. PEKOLA Y ÉDGAR ROLDÁN/CENTRO INTERNACIONAL DE FÍSICA TEÓRICA DE TRIESTE/UNIVERSIDAD DE AALTO

CRONOBIOLOGÍA

El envejecimiento altera los ritmos circadianos

Las células van acumulando daños a lo largo del tiempo y, en su intento por repararlos, dejan de lado funciones rítmicas esenciales

GUIOMAR SOLANAS FUSTER



INSTITUTOS NACIONALES DE SALUD DE EE.UU.

La luz del sol rige la mayoría de las actividades que realizamos en nuestro día a día a través de los ritmos circadianos. Solo hay que pensar cuán diferente es nuestro comportamiento a mediodía y a medianoche. Este cambio en nuestra actividad es el reflejo de lo que sucede en el interior de nuestro cuerpo. Las funciones de cada uno de los órganos se hallan finamente controladas para que tengan lugar en un momento u otro del día. Los ritmos se producen incluso a nivel celular. Un ejemplo son las células madre, cuyos ritmos circadianos hacen posible que el organismo se regenere de forma cíclica.

Sin embargo, en nuestras investigaciones hemos comprobado que, con el envejecimiento y el estrés acumulado, las células madre ven alteradas sus funciones rítmicas y, al intentar corregir ese desajuste, dejan de lado algunas de las tareas necesarias para el buen funcionamiento del organismo.

Relojes en el cuerpo, los órganos y las células

Los ritmos circadianos están presentes en todos los organismos, desde los más sencillos, como las bacterias, hasta los más complejos, como los mamíferos. Poder anticipar qué ocurrirá, cuándo y en qué orden a lo largo del día le permite al cuerpo estar preparado para numerosos procesos. Y, al no tener que estar listo en todo momento para desempeñar cualquier tarea, se ahorra una preciosa energía.

Tomemos por ejemplo la hora de comer. Nuestro organismo se sincroniza para recibir el alimento y activa los mecanismos necesarios para la digestión, que empieza por el estómago, con la intervención del páncreas, el hígado, la vesícula biliar y otros órganos. Si el cuerpo tuviera que estar preparado para la digestión durante las 24 horas del día, los órganos involucrados tendrían que dejar de ejercer otras funciones vitales, como la eliminación de compuestos tóxicos, la segregación de hormonas o la propia regeneración.

Nuestro organismo funciona como una orquesta con diferentes instrumentos (los órganos), e igual que en ella, hay un director que los sincroniza: el núcleo supraquiasmático. Situado en el hipotálamo, este núcleo recibe las señales lumínicas desde la retina y las reenvía al resto de los tejidos para que todo el organismo siga el mismo compás.

Aunque los ritmos circadianos son muy robustos, permiten flexibilizar las funciones orgánicas y van ajustándose según las necesidades. De este modo, pueden adaptarse a los cambios de horario rigiéndose por la luz externa, y también a los hábitos alimentarios y las interacciones sociales. Esta organización temporal ayuda al funcionamiento óptimo, por lo que respetar los ritmos circadia-

nos resulta fundamental para mantener un buen estado de salud. De hecho, se ha observado que, si se alteran de forma continuada, aumenta el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, metabólicas e incluso cáncer.

Los ritmos circadianos no solo existen en casi todos los tejidos y órganos, sino también en las células que los componen. Un ejemplo lo hallamos en la reparación de los posibles daños en el ADN durante la división celular: resulta mucho más eficaz corregirlos primero y luego copiar ese ADN reparado para generar las dos células hijas que no hacerlo después de la división, que implica el doble de trabajo. Aquí los ritmos resultan esenciales.

Células madre desajustadas

Un tipo particular de células controladas por el reloj circadiano son las células madre. Presentes en casi todos los órganos, se mantienen en un estado inmaduro antes de diferenciarse y convertirse en una célula especializada del tejido u órgano. Su función principal es, pues, generar y reponer casi todos los tipos de células maduras de un tejido. Los ritmos circadianos marcan las horas y el orden en los que las células madre ejecutan sus tareas. Por ejemplo, en la epidermis (la capa más superficial de la piel) esas funciones son la división, la diferenciación en células especializadas de la epidermis y la reparación de los daños del ADN.

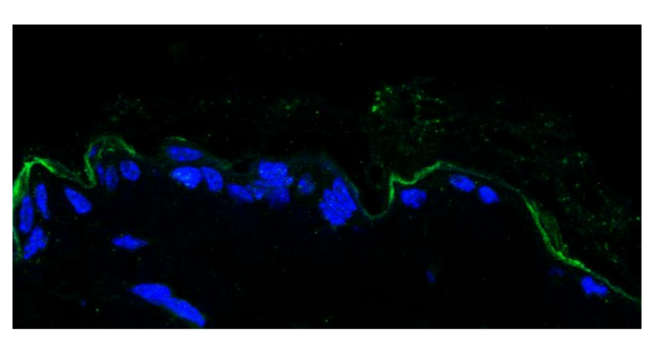
Para estudiar qué funciones están controladas por el reloj circadiano en un tipo celular en particular, se analiza primero la expresión de los genes de esas células en diferentes momentos del día y se identifican los que se activan de forma regular; a continuación, se determinan las funciones asociadas a ese conjunto de genes, a los que denominamos circadianos.

Hasta hace poco se suponía que los relojes circadianos se desajustaban como consecuencia de la edad, aunque se ignoraban los procesos celulares y moleculares implicados. Para conocer cómo se produce ese desajuste, en una fase inicial de nuestros estudios tomamos células madre de la epidermis y del músculo de ratones jóvenes y viejos y examinamos la expresión de sus genes. Observamos que, al avanzar la edad, las oscilaciones de los genes que hacen funcionar el reloj circadiano se mantenían intactas. En cambio, los genes controlados por este reloj, que en condiciones normales se expresan de modo rítmico, cambiaban de forma notable. En otras palabras: con la edad, los genes del reloj no se alteran, pero sí los genes sobre los que estos actúan. En las células madre de los ratones jóvenes, observamos que los segundos desempeñaban funciones rítmicas esenciales, como la reparación del tejido y la diferenciación. Por el contrario, en las de ratón viejo, esos mismos genes modificaban sus funciones y destinaban el esfuerzo a corregir los errores acumulados en el tejido debido a la edad.

Los errores acumulados dependen del tipo de célula madre analizada, según hemos comprobado en nuestras investigaciones. En la epidermis, que constituye una barrera protectora contra los patógenos y la deshidratación, las células madre tienen que dividirse a menudo para rellenar el espacio que dejan las células muertas descamadas. En esas células madre, los errores se asocian a la suma de daños en el ADN y al estrés oxidativo, y son consecuencia de la elevada tasa de renovación y división: cuantas más divisiones se producen, más probable es que los daños se propaguen a las sucesivas células hijas.

Por el contrario, las células madre del músculo solo se multiplican cuando tienen que reparar posibles lesiones en la fibra muscular. En ellas, el estrés se deriva de la necesidad de deshacerse de los componentes intracelulares dañados (un proceso denominado autofagia) sin que puedan dividirse ni morir, ya que ello afectaría a la fisiología del tejido. La autofagia se ejecuta principalmente durante la mañana en el tejido joven. Pero en el viejo se reduce y pierde preferencia por las primeras horas.

En nuestros trabajos hemos observado que, en ambos tipos de células madre, los genes destinados a solucionar los daños asociados a la edad y al estrés se vuelven rítmicos. Por ejemplo, la expresión de los genes que controlan la inflamación se hace regular, lo que perpetúa las reacciones inflamatorias. Desconocemos cuál es el motivo de ese cambio, solo sabemos que esos ritmos son circadianos (se producen con una frecuencia de 24 horas aproximadamente). Como consecuencia de ello, los genes responsables de las funciones esenciales de manutención de los tejidos dejan de expresarse a una hora concreta del día (como sucede en los jóvenes) y, por tanto, se perturba aún más su regeneración, lo que agrava el proceso de envejecimiento.



¿DIETA ANTIENVEJECIMIENTO? Estas secciones de piel corresponden a dos ratones de la misma edad que han recibido distinta alimentación. Los daños en el ADN (*teñidos con un marcador verde*) de los núcleos (*azul*) son más abundantes en el ratón envejecido con dieta a voluntad (*arriba*) que en el ratón envejecido con dieta hipocalórica (*abajo*).

CORTESÍA DE LA AUTORA

La influencia del metabolismo

Una señal muy poderosa de sincronización del reloj circadiano, además de la luz, es la alimentación. La mayoría de los órganos responden a estímulos metabólicos regulares. De hecho, en modelos animales, se ha observado que una dieta con restricción calórica o con períodos de ayuno (ayuno intermitente) puede cambiar la fase de oscilación del reloj. De este modo, es posible simular un cambio de huso horario con la dieta sin necesidad

de variar el régimen de luz. Y se ha demostrado que estos cambios en el metabolismo retrasan el envejecimiento y la aparición de enfermedades asociadas a la edad, como la diabetes o las cardiopatías. Se piensa que ello se debe al reajuste de la expresión de los genes que forman parte del mecanismo básico del reloj circadiano. Esto nos lleva a plantearnos la siguiente pregunta: ¿sería la dieta hipocalórica una señal lo bastante eficaz para evitar la alteración de las funciones rítmicas?

En nuestra investigación examinamos los mismos tipos de células madre de ratón viejo, pero en este caso después de someterlos a una dieta hipocalórica durante el último tercio de su vida. Observamos que las células madre de estos ratones acumulaban menos rasgos de estrés, en comparación con las de animales viejos que habían recibido una alimentación normal. Además, sus funciones rítmicas eran más similares a las de los ratones jóvenes, lo que demuestra la importancia de las señales metabólicas en el envejecimiento y, en particular, en las funciones rítmicas de los órganos y sus células madre. (Hay que advertir que las investigaciones sobre los efectos de la dieta hipocalórica o del ayuno intermitente en las personas todavía se hallan en fase de ensayos clínicos, por lo que nunca debe realizarse ningún tipo de dieta que pueda poner en riesgo la salud sin la supervisión de un nutricionista.)

Junto a investigadores de la Universidad de California en Irvine, hemos comprobado, asimismo, que, en los ratones, las funciones rítmicas del hígado se remodelan también a lo largo de la vida. Con la edad, sus tareas elementales se vuelven menos regulares, y el reloj circadiano se reprograma para controlar funciones relacionadas con el estrés acumulado (como la reparación de los daños en el ADN). Igual que sucede en las células madre, este cambio puede evitarse si se estimulan las señales metabólicas a través de la dieta. Estos resultados ponen de relieve la importancia y la generalización de los ritmos circadianos, que no se restringen a las células madre de un tipo de tejido específico, sino que son aplicables a todos los órganos del cuerpo.

A raíz de todas estas observaciones, nos surgió la pregunta de cómo se produce la reprogramación del reloj circadiano como consecuencia de la edad: ¿de qué modo olvida el reloj el control de las funciones de manutención? ¿Cuáles son las señales que hacen que, en su lugar, controle genes relacionados con el estrés acumulado en los tejidos a lo largo de la vida? Para averiguarlo, estamos aplicando técnicas de epigenómica para analizar la localización en el ADN de diferentes proteínas que modifican la expresión de los genes. Durante el envejecimiento, estas proteínas pueden cambiar de ubicación en el ADN. Conocer con detalle su posición en distintas edades nos permitirá saber de qué modo regulan en cada momento la expresión de los genes vinculados con el reloj circadiano. Estas investigaciones todavía se hallan en desarrollo, y las respuestas que nos proporcionen pueden llevarnos un paso más allá en el conocimiento de la fisiología del envejecimiento.

Guiomar Solanas Fuster
es investigadora del Instituto de Investigación Biomédica de Barcelona y del Instituto de Ciencia y Tecnología de Barcelona.

PARA SABER MÁS

Effect of feeding regimens on circadian rhythms: Implications for aging and longevity. Oren Froy y Ruth Miskin en *Aging*, vol. 2, enero de 2010.
Regenerating the skin: A task for the heterogeneous stem cell pool and surrounding niche. Guiomar Solanas y Salvador Aznar Benitah en *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, vol. 14, págs. 737-748, septiembre de 2013.
Circadian reprogramming in the liver identifies metabolic pathways of aging. Shogo Sato et al. en *Cell*, vol. 170, págs. 664-677.E11, agosto de 2017.
Aged stem cells reprogram their daily rhythmic functions to adapt to stress. Guiomar Solanas et al. en *Cell*, vol. 170, págs. 678-692.E20, agosto de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nuestros relojes internos. Keith C. Summa y Fred W. Turek en *IyC*, septiembre de 2015.
Relojes internos desajustados. Henrik Oster en *MyC*, n.º 86, 2017.
El reloj intracelular. Veronique Greenwood en *IyC*, abril de 2019.

ASTRONOMÍA

Tres misiones para desvelar los misterios de Venus

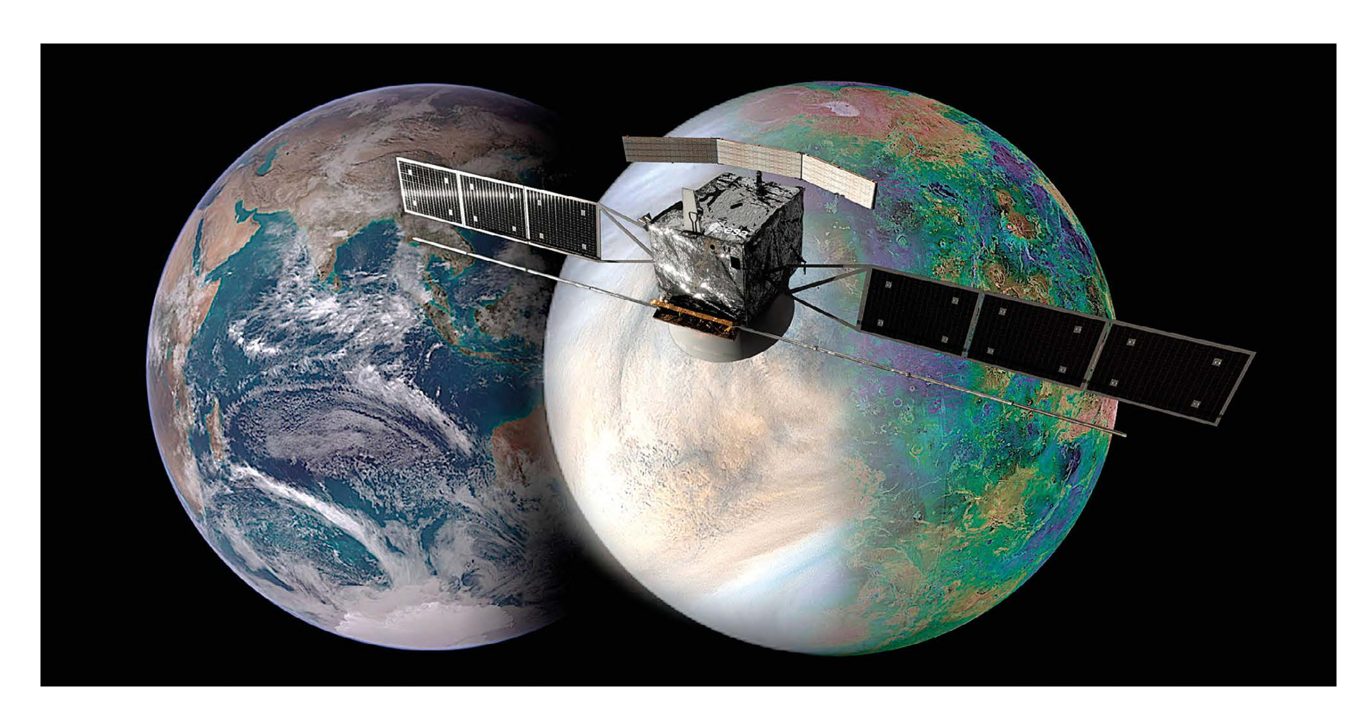
¿Por qué Venus es tan diferente a la Tierra? ¿Tuvo océanos? ¿Presenta actividad volcánica? Dos misiones de la NASA y una de la ESA examinarán estas y otras preguntas sobre la atmósfera y la geología del planeta

JONATHAN O'CALLAGHAN

Tras años de espera, una flota de naves espaciales viajará a Venus. Los científicos estadounidenses se emocionaron a principios de este mes cuando la NASA aprobó no una, sino dos nuevas misiones a nuestro vecino planetario más próximo. Poco después, la Agencia Espacial Europea (ESA) confirmó su propia misión. Esas expediciones abren la posibilidad de responder a preguntas esenciales sobre el planeta, desde si alguna vez tuvo océanos y, por lo tanto, fue habitable, hasta si aún posee volcanes activos.

El 2 de junio, la NASA notificó que enviaría dos naves espaciales a Venus a lo largo de esta década: VERITAS, un orbitador que cartografiará la superficie del planeta, y DAVINCI+, con una sonda que se internará en la atmósfera de Venus. El 10 de junio, la ESA anunció su propio orbitador, EnVision, que se lanzará a principios de la década de 2030 para tomar imágenes de radar de alta resolución de la superficie del planeta.

«Estamos encantados de que todo nuestro trabajo haya dado sus frutos», comparte Colin Wilson, planetólogo de la



CONCEPCIÓN ARTÍSTICA de la misión EnVision de la Agencia Espacial Europea, uno de los tres proyectos aprobados el pasado junio que explorarán la atmósfera y la geología de Venus.

Universidad de Oxford y uno de los científicos principales adjuntos de EnVision.

Las dos naves de la NASA supondrán sus primeras misiones a Venus desde el orbitador Magallanes, que despegó en 1989. EnVision será la primera de la ESA desde el lanzamiento de la sonda Venus Express en 2005. Ahora mismo solo hay un satélite en órbita alrededor del planeta: la nave japonesa Akatsuki, que estudia su atmósfera desde 2015. «Venus ha permanecido en el olvido durante demasiado tiempo», lamenta Håkan Svedhem, investigador de la ESA y responsable científico de la misión Venus Express.

Mientras la comunidad de planetólogos celebra estos anuncios, examinemos las cuestiones que los científicos esperan responder con estas misiones.

¿Por qué Venus y la Tierra son tan diferentes?

Una de las principales preguntas sobre Venus es por qué, si su tamaño y distancia al Sol son similares a los de la Tierra, es un lugar infernal (con una atmósfera venenosa compuesta sobre todo por dióxido de carbono y temperaturas superficiales tan altas como para fundir el plomo) en vez de un acogedor oasis para la vida.

«¿Por qué Venus, nuestro planeta hermano, no es nuestro planeta gemelo?», se pregunta Paul Byrne, planetólogo de la Universidad Estatal de Carolina del Norte en Raleigh. «¿Cómo es posible que un mundo que funcionalmente es igual a la Tierra tenga una historia tan distinta?»

Para averiguarlo, los científicos usarán las nuevas misiones para explorar el pasado geológico del planeta y comprender cómo evolucionó. VERITAS y EnVision serán cruciales para este objetivo, ya que estudiarán el registro geológico del planeta tomando imágenes de su superficie con sus instrumentos de radar.

La misión DAVINCI+, por su parte, tendrá un orbitador que tomará imágenes del planeta en luz ultravioleta e infrarroja. Además, dejará caer una pequeña sonda esférica en la atmósfera de Venus. Esa sonda tomará muestras de la atmósfera y buscará gases nobles inertes, como el helio y el xenón, que perduran mucho tiempo. Tales gases «aportarán pistas sobre la formación y evolución temprana del planeta», señala Wilson. «¿Proceden del magma interior? ¿Estaban ahí desde la formación? ¿Los trajeron los cometas?»

¿Tuvo Venus océanos?

Dilucidar si Venus tuvo en algún momento masas de agua líquida en su superficie resulta crucial para entender por qué es tan diferente a la Tierra. Los astrónomos observan en la atmósfera del planeta indicios de que hubo agua en el pasado, pero no está claro si llenaba antiguos océanos superficiales que se perdieron conforme el planeta se calentaba o si existió solo en forma de vapor en los albores del planeta. La primera opción sugeriría que hubo un tiempo en que el planeta fue habitable, igual que la Tierra.

DAVINCI+ ayudará a responder esta cuestión cuando estudie la atmósfera del planeta. Durante su descenso de alrededor de una hora, la sonda tomará muestras de la atmósfera a intervalos que serán de hasta 100 metros a altitudes bajas y realizará mediciones de gran precisión para hallar qué gases están presentes, apunta James Garvin, científico jefe del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA y líder de la misión DAVINCI+. Eso mejorará los datos de la atmósfera de Venus que adquirieron las sondas Venera de la Unión Soviética en los años 60, 70 y 80.

«Las firmas químicas nos revelarán la historia, persistencia y naturaleza de los antiguos océanos», afirma. «Eso fijará las condiciones de contorno para todos. Entonces podremos adaptar los grandes modelos climáticos y plantear preguntas con otras misiones como VERITAS y EnVision, con su cartografiado global.»

¿Tuvo Venus continentes?

Alrededor del 7 por ciento de la superficie de Venus está cubierta por regiones altas conocidas como *tesserae*, mesetas que se elevan sobre la superficie circundante y que «podrían ser el equivalente a los

NASA/JAXA/ISAS/DARTS/DAMIA BOUIC/VR2PLANETS

continentes de la Tierra», señala Byrne.

Para comprobar si es así, VERITAS estudiará la composición de esas mesetas y comparará su contenido en basalto (una roca volcánica) con el de otras regiones más bajas. «En la Tierra, cuando se formaron los continentes, las ingentes cantidades de basalto de la corteza oceánica se fundieron en presencia de agua», explica Suzanne Smrekar, responsable de la misión VERITAS en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA. «Si logramos poner a prueba esa hipótesis, podremos demostrar que esas enormes mesetas representan "huellas dactilares" de una época en la que había agua». En ese supuesto, las *tesserae* serían las masas continentales que una vez estuvieron rodeadas de agua.

La sonda de DAVINCI+ descenderá sobre una de esas mesetas, llamada Alpha Regio, y tomará hasta 500 imágenes mientras cae a la superficie. Aunque la nave acabará destruida, existe una pequeña posibilidad de que sobreviva en la superficie durante varios minutos antes de sucumbir a las enormes presiones y temperaturas. Esas fotografías de la meseta podrían resultar esclarecedoras. «Las imágenes finales deberían tener una resolución de decenas de centímetros», asegura Garvin.



IMAGEN DE RADAR de la superficie de Venus tomada por la sonda Magallanes de la NASA. En la parte derecha aparece el monte Maxwell, de más de 5 kilómetros de altura, cuya superficie brillante insinúa la presencia de «nieve».

NASA/JPL

¿Conserva Venus actividad volcánica?

Las sondas anteriores han demostrado la existencia de volcanes en Venus, pero no está claro si alguno ha estado geológicamente activo en los últimos miles de años, o si todavía lo está. Tanto VERITAS como EnVision ayudarán a responder esta pregunta al cartografiar la superficie. En concreto, se espera que las imágenes de alta resolución de EnVision revelen características superficiales que no se habían apreciado antes.

El cartografiado incluirá la búsqueda de coladas de lava (entre otros elementos volcánicos), y el grado de erosión que hayan sufrido podría delatar cuándo fueron expulsadas. «Los flujos de lava frescos pueden parecer especialmente oscuros o negros», expone Wilson.

La sonda Akatsuki ha observado cambios recientes en la cantidad de luz ultravioleta que absorbe la atmósfera de Venus, lo que podría indicar una actividad volcánica reciente. «El clima cambiante de Venus [hoy en día] podría depender de la actividad volcánica», señala Masato Nakamura, investigador del Instituto de Ciencia Espacial y Astronáutica de Japón y director del proyecto Akatsuki.

¿Hay fosfano en Venus?

El año pasado, algunos científicos anunciaron que habían detectado fosfano (un compuesto de fósforo que se considera un posible indicador de vida) en Venus. No estaba claro cómo se había producido, pero existía la sugerente posibilidad de que se debiera a la presencia de microbios en la atmósfera.

El resultado se ha puesto en duda desde entonces y la presencia de fosfano ha suscitado acalorados debates. DAVINCI+ podría zanjar la discusión si detectase fosfano en las muestras de la atmósfera que tomará.

«Si hay mucho fosfano, seremos capaces de medirlo», confirma Garvin.

¿Hay «nieve» en Venus?

Las montañas del planeta que superan los 2,6 kilómetros de altura tienen un aspecto extrañamente reflectante, como las de la Tierra, «donde hay nieve y escarcha por encima de una cierta altitud», apunta Wilson. Pero las temperaturas en Venus son demasiado altas para que exista agua, así que los científicos se preguntan qué podría haber en esas regiones brillantes.

Una posibilidad es la «nieve semiconductora», una mezcla de metales exóticos como bismuto, telurio y azufre, que se sabe que son producidos por la actividad volcánica y pueden condensarse a esas alturas. DAVINCI+ podría detectar esas sustancias en la atmósfera, mientras que VERITAS y EnVision buscarán depósitos cerca de cualquier fisura volcánica.

Quizá llegue el día en que los investigadores tomen muestras de esas cimas directamente, gracias a un módulo de aterrizaje. «Sin duda, es técnicamente posible», concluye Wilson.

Jonathan O'Callaghan
es periodista científico especializado en vuelos espaciales comerciales, exploración espacial y astrofísica.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 594, pág. 185-186, 2021.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Tesserae on Venus may preserve evidence of fluvial erosion. S. Khawja et al. en *Nature Communications*, vol. 11, art. 5789, noviembre de 2020.

Deep atmosphere of Venus probe as a mission priority for the upcoming decade. James Garvin et al. en *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 53, art. 337, marzo de 2021.

NASA missions to test idea of a watery past for Venus. Paul Voosen en *Science*, vol. 372, págs. 1136-1137, junio de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cambio climático global en Venus. Mark A. Bullock y David H. Grinspoon en *IyC*, mayo de 1999.

Pérdidas en las atmósferas planetarias. David C. Catling y Kevin J. Zahnle en *IyC*, julio de 2009.

El exoplaneta vecino. M. Darby Dyar, Suzanne E. Smrekar y Stephen R. Kane en *IyC*, abril de 2019.



EPIDEMIOLOGÍA

La emergencia de las infeccion



EL HONGO *CANDIDA AURIS* acecha en los hospitales, donde infecta a pacientes con el sistema inmunitario debilitado.

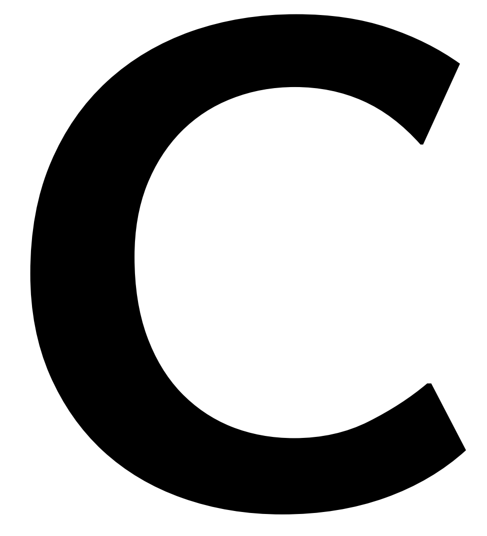
es fúngicas

Causantes de la muerte de 1,6 millones de personas cada año, ciertos hongos se están erigiendo entre los microbios más mortíferos del planeta

Maryn McKenna

Maryn McKenna es periodista especializada en salud pública, salud global y política alimentaria, y es miembro del Centro de Estudios de la Salud Humana de la Universidad Emory.





orría la última semana de junio de 2020, en plena segunda ola pandémica de COVID-19 en EE.UU. Los infectados superaban ya los 2,4 millones y los fallecidos se acercaban a los 125.000 en el país. En el despacho de su casa, en Atlanta, Tom Chiller estaba consultando los correos electrónicos y se echaba las manos a la cabeza.

Médico y epidemiólogo, Chiller es jefe de sección en la red de Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU. (CDC), a cargo del departamento que supervisa los riesgos sanitarios que entrañan los hongos, como los mohos o las levaduras. Pero tuvo que aparcar las responsabilidades del cargo en marzo de 2020, cuando comenzaba a quedar clara la magnitud de la nueva amenaza vírica, al tiempo que las autoridades de Nueva York declaraban el confinamiento de la ciudad y los CDC enviaban a casa a la práctica totalidad de su plantilla, miles de empleados. Desde entonces, Chiller ha participado en el trabajo frustrante de esta agencia sanitaria contra la COVID-19. Sus empleados han estado colaborando con los departamentos estatales de sanidad para supervisar los informes referentes a los casos y las muertes, así como las normativas que debían aplicarse para permanecer a salvo.

Cansado, Chiller se disponía a revisar de nuevo el buzón de correo. Entre la pila de mensajes sin leer había un comunicado remitido por uno de sus subordinados, que le hizo ponerse en pie y apretar los dientes. Algunos hospitales cercanos a Los Ángeles informaban de un nuevo problema: varios pacientes habían contraído sobreinfecciones causadas por el hongo *Candida auris*. El estado de California había declarado la alerta máxima.

Chiller sabía todo lo que se puede saber de esta especie, posiblemente como ninguna otra persona del país. Justamente hacía casi cuatro años que él mismo y los CDC habían difundido un comunicado urgente a los hospitales en el que aconsejaban reforzar la vigilancia. El hongo no había hecho acto de presencia en EE.UU. aún, pero Chiller había mantenido contactos con colegas de otros países y sabía lo que pasaba cuando irrumpía en un centro sanitario. Capaz de resistir la mayor parte de los nuevos antifúngicos, el hongo crece en superficies duras y frías y se burla de los productos de limpieza al uso; algunos hospitales afectados habían tenido que deshacerse de equipos e incluso demoler paredes para eliminarlo. Había causado brotes de propagación rápida y matado a dos tercios de los infectados.

Poco después de aquel comunicado, *C. auris* desembarcó en EE.UU. y, antes de que acabase 2016, lo habían contraído 14 personas, de las que cuatro fallecieron. Desde entonces, los CDC han seguido atentamente sus movimientos y lo han clasificado en un pequeño grupo de enfermedades peligrosas, de cuya incidencia deben informar los médicos y los servicios sanitarios a la agencia. A finales de 2020 ya se superaban los 1500 casos, repartidos por 23 estados del país. Y entonces llegó la COVID-19, que hizo desbordar los hospitales y obligó a redirigir todos los esfuerzos hacia el nuevo virus, dejándose de lado otros patógenos rebeldes.

Desde el estallido de la pandemia, a Chiller le había preocupado su posible conjunción con las infecciones fúngicas. Los primeros informes clínicos de la COVID-19, publicados por científicos chinos en revistas internacionales, describían a pacientes con un cuadro de suma gravedad que debían ingresar a cuidados intensivos: se les inducía el coma, se les intubaba, se los conectaba a un respirador y, a través de múltiples vías intravenosas, se les administraba grandes dosis de fármacos para acabar con la infección y rebajar la inflamación. Esas intervenciones drásticas quizá salvaran a los infectados del virus, pero los fármacos inmunodepresores desarmaban su sistema inmunitario innato, mientras que los antibióticos de amplio espectro mataban las bacterias beneficiosas que mantienen a raya a los intrusos micro-

PÁGINAS ANTERIORES: JUAN GAERTNER, SCIENCE SOURCE

EN SÍNTESIS

Los hongos constituyen un vasto reino, con unos seis millones de especies. Aunque la mayoría convive con nosotros de forma pacífica, numerosos hongos emergentes están amenazando nuestra salud.

Su rápida capacidad de adaptación a ambientes nuevos les permite saltar desde otras especies animales a los humanos, en los que ganan virulencia cuando el sistema inmunitario se halla debilitado.

Si bien se están desarrollando tratamientos contra los hongos, estos adquieren resistencia a los fármacos con rapidez. En la actualidad los esfuerzos se centran en la prevención y la búsqueda de vacunas.



TORRENCE IRVIN, ciudadano de Patterson, en California, contrajo lo que parecía un vulgar resfriado en septiembre de 2018. A los siete meses había perdido el 75 por ciento de su capacidad pulmonar. En realidad, había contraído una infección fúngica llamada fiebre del Valle, o coccidioidomicosis. Un fármaco experimental le salvó la vida.

TIMOTHY ARCHIBALD

bianos. Los pacientes quedaban casi indefensos ante cualquier otro patógeno que rondase cerca.

Chiller y sus colaboradores comenzaron a contactar discretamente con colegas de EE.UU. y Europa, en busca de cualquier indicio alarmante de que la COVID-19 estuviese facilitando las cosas a los hongos mortíferos. No tardaron en llegar notificaciones de infecciones procedentes de India, Italia, Colombia, Alemania, Austria, Bélgica, Irlanda, Países Bajos y Francia. Esos mismos hongos mortales comenzaban a afectar a los pacientes estadounidenses: eran los primeros indicios de una segunda epidemia, montada a lomos de la pandemia vírica. Y no solo se trataba de *C. auris*. Otro hongo temible, *Aspergillus*, estaba empezando también a pasar factura. «Se extenderá por todas partes. No creo que podamos contenerlo», afirma Chiller.

Tendemos a pensar en los hongos, si lo hacemos, como en molestias banales: el moho que recubre el queso, el verdín que surge en el calzado guardado en el fondo del armario, las setas que brotan en el jardín después de las lluvias intensas. Nos damos cuenta de que están ahí y, sin más, los rascamos o los aspiramos, sin percatarnos de que estamos ante la periferia frágil de una red que teje el planeta. Los hongos constituyen un reino propio entre los seres vivos, con alrededor de seis millones de especies, que van desde aliados seculares, como la levadura de panadería, hasta algunas especies silvestres raras. Se distinguen de los demás reinos en formas intrincadas. A diferencia de los animales, las células fúngicas poseen paredes; a diferencia de los vegetales, no son capaces de fabricar su sustento; y, a diferencia de las bacterias, mantienen el ADN en el interior de un núcleo y llenan las células con orgánulos, lo que los hace, a escala celular, extrañamente similares a nosotros. Los hongos descomponen las rocas, nutren las plantas, siembran nubes, recubren nuestra piel y se apiñan en nuestro intestino, un mundo viviente oculto y en buena parte desconocido que reside a nuestro alrededor y en nuestro interior.

El equilibrio de esa coexistencia se está rompiendo. Los hongos están rebasando los límites ambientales donde solían vivir; se están adaptando a entornos antes adversos para ellos al adoptar nuevos comportamientos que les permiten saltar entre especies de formas novedosas. Al mismo tiempo que ejecutan esas maniobras, ganan en virulencia y ponen en peligro la salud humana de modos y en magnitudes nunca vistos.

La vigilancia destinada a detectar las micosis graves es desigual, por lo que es probable que estén subestimadas. Pero un cálculo aceptado señala que posiblemente 300 millones de personas padezcan micosis cada año y 1,6 millones fallezcan, cifras superiores a las del paludismo y semejantes a las de la tuberculosis. Solo en EE.UU., los CDC calculan que cada año son hospitalizados más de 75.000 ciudadanos y 8,9 millones más acuden al médico por tal causa, con un coste de 7200 millones de dólares anuales. En España, 8,1 millones de personas sufren una infección fúngica cada año*.

Para los médicos y los epidemiólogos resulta sorprendente e inquietante. La doctrina médica sostiene que estamos protegidos frente a los hongos no solo gracias a nuestras sucesivas líneas de defensa inmunitarias, sino porque somos mamíferos, con una temperatura corporal superior a la preferida por ellos. La superficie externa del cuerpo, por ser más fría, está expuesta a pequeños ataques, como son el pie de atleta, la candidiasis o la tiña, pero en las personas sanas, las infecciones invasoras han sido poco frecuentes.



Es posible que hayamos pecado de confiados. «Tenemos un punto ciego enorme», advierte el médico y microbiólogo molecular Arturo Casadevall, de la Facultad de Salud Pública Bloomberg de la Universidad Johns Hopkins. «Si salimos a la calle y preguntamos a la gente a qué temen, nos responderán que tienen miedo de las bacterias o los virus, pero no de morir a causa de un hongo.»

Irónicamente, nuestro desarrollo científico nos ha hecho vulnerables. Los hongos se aprovechan del sistema inmunitario debilitado, pero hasta mediados del siglo pasado las personas inmunodeprimidas no vivían mucho tiempo. Desde entonces, los avances de la medicina han aumentado la esperanza de vida de las personas, aunque su sistema inmunitario esté debilitado a causa de una enfermedad, del tratamiento contra el cáncer o del envejecimiento. También se ha desarrollado una gama de tratamientos que deprimen deliberadamente las defensas para evitar el rechazo de los órganos trasplantados y combatir trastornos autoinmunitarios, como el lupus o la artritis reumatoide. De modo que ahora hay un vasto número de personas especialmente vulnerables a los hongos. (Fue una micosis, la neumonía por *Pneumocystis carinii*, la que puso en alerta a los médicos ante los primeros casos de sida, este junio hizo cuarenta años.)

No toda nuestra vulnerabilidad es culpa del progreso de la medicina. Otras actividades humanas han tendido más puentes entre el mundo de los hongos y el nuestro. Talamos los bosques y las selvas para sembrar cultivos y edificar ciudades, y perturbamos lo que era un equilibrio estable entre los hongos y los hospedadores. Transportamos bienes y animales a lo largo y ancho del planeta, con los hongos subidos en ellos. Fumigamos los cultivos con fungicidas y promovemos la resistencia de los organismos que residen cerca. Algunas acciones fomentan el calentamiento del clima y los hongos se adaptan a él, con lo que se reduce la brecha entre su temperatura predilecta y la nuestra, factor que nos ha protegido desde hace mucho tiempo.

Pero los hongos no están invadiendo nuestro terreno desde un lugar recóndito o extraño. Siempre han estado con nosotros, entrelazados con nuestra vida y nuestro entorno, incluso con nuestro cuerpo: cada habitante del planeta inhala como mínimo 1000 esporas de hongo al día. No es posible mantenernos apartados por completo del reino fúngico, así que los científicos intentan descubrir a toda prisa la multitud de formas en que desarman nuestras defensas antimicrobianas, con el fin de diseñar estrategias para rehacerlas.

Sorprende que la humanidad se haya sentido tan a salvo de los hongos cuando hace siglos que sabemos que devastan los cultivos. En la década de 1840, uno de ellos, el mildiu de la patata (*Phytophthora infestans*), arruinó la cosecha de este tubérculo en Irlanda: más de un millón de personas murió de hambre, uno de cada ocho irlandeses. (Antaño era considerado un hongo propiamente dicho, pero ahora se le clasifica como un tipo muy afín, un oomiceto.) Tres décadas más tarde, la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) devastó los cafetales del sur de Asia, remodelando por completo la agricultura colonial de India y Sri Lanka, puesto que la producción cafetera se trasladó a América Central y del Sur. Los hongos son los culpables de que decenas de millones de castaños americanos desapareciesen de

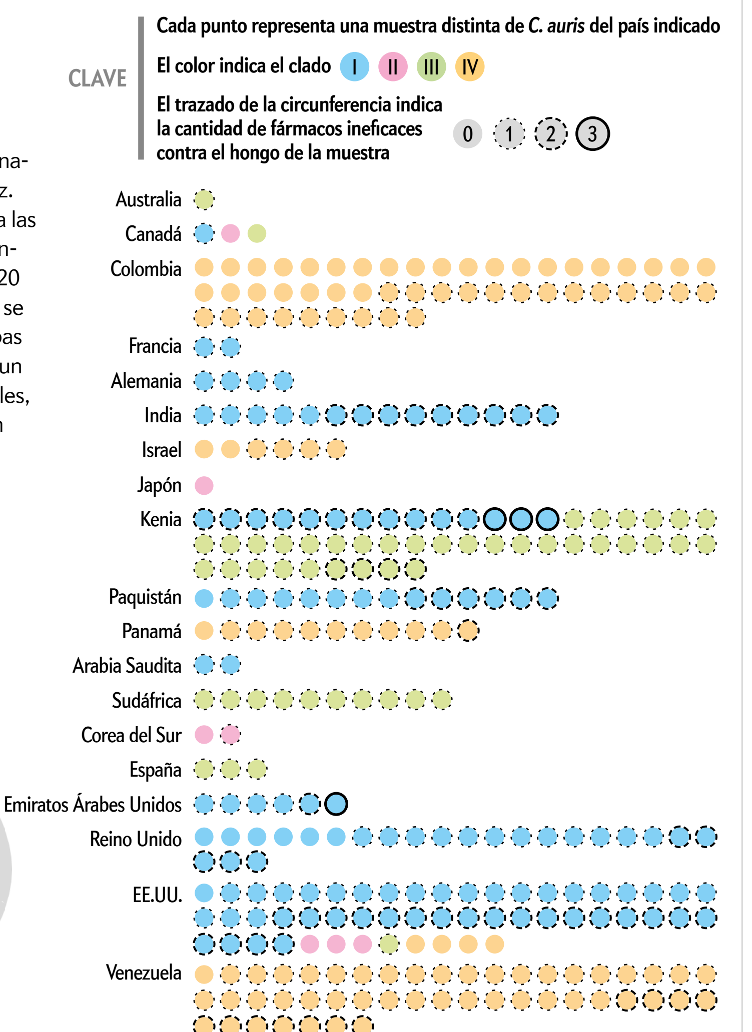
* FUENTE: «BURDEN OF SERIOUS FUNGAL INFECTIONS IN SPAIN». JUAN L. RODRÍGUEZ-TUDELA ET AL. EN *CLINICAL MICROBIOLOGY AND INFECTION*, VOL. 21, PÁGS. 183-189, FEBRERO DE 2015.

Un temible hongo farmacorresistente

La levadura *Candida auris* apareció por primera vez a finales de 1990 y se ha propagado por el planeta con rapidez. Provoca la muerte de hasta dos tercios de las personas a las que infecta con sus esporas, que viajan en el torrente sanguíneo y germinan en órganos vitales. Un análisis de 2020 la halló en 19 países de los cinco continentes. La especie se divide en cuatro grupos genéticos o clados. En las pruebas de resistencia todos demostraron serlo como mínimo a un fármaco de las tres grandes clases* de antifúngicos: azoles, polienos y equinocandinas. Numerosas muestras fueron resistentes a dos, y algunas muestras del clado I fueron inmunes a las tres.

Países donde se han analizado muestras de *C. auris*





*Existen otras dos clases, que no se emplean contra este tipo de infección.

FUENTE: «TRACING THE EVOLUTIONARY HISTORY AND GLOBAL EXPANSION OF CANDIDA AURIS USING POPULATION GENOMIC ANALYSES», NANCY A. CHOW ET AL. EN *AMERICAN SOCIETY FOR MICROBIOLOGY*, VOL. 11, 28 DE ABRIL DE 2020. AMANDA MONTAÑEZ (*gráficos*)

los bosques de los Apalaches en la década de 1920 y que veinte años después hubiese que talar millones de olmos en las ciudades del país. Cada año asolan una quinta parte de los cultivos alimentarios del mundo.

Con todo, durante años la medicina contempló toda esa devastación en el reino vegetal sin pensar que la especie humana o los animales pudieran estar también en riesgo. «Los fitopatólogos y los agricultores se toman muy en serio los hongos, pues se juegan el negocio», explica Matthew C. Fisher, profesor de epidemiología en el Colegio Imperial de Londres, cuya labor se centra en la detección de hongos peligrosos emergentes. «Pero, desde la perspectiva de las enfermedades que afectan a la fauna y al hombre, han permanecido ignorados.»

Así que cuando los gatos vagabundos de Río de Janeiro comenzaron a caer enfermos, nadie se preguntó al principio por la razón. La vida del gato callejero es dura, en competencia diaria por el sustento que rebuscan o mendigan mientras paren una camada tras otra. Pero en el verano de 1998, docenas y después cientos de gatos comenzaron a mostrar lesiones horribles: llagas supurantes en las garras y las orejas, ojos hinchados y opacos, y tumoraciones que brotaban de la cara. Los mininos de Río viven entremezclados con los habitantes de la ciudad: los niños juegan con ellos y, sobre todo en las barriadas pobres, las amas de casa los incitan a que ronden por los alrededores, a la caza de ratas y ratones. Así que algunos niños y madres no tardaron en enfermar: en sus manos aparecían heridas abiertas, circulares y con costras en los bordes, con nódulos indurados y enrojecidos, que ascendían en hilera por los brazos.

En 2001, investigadores de la Fundación Oswaldo Cruz, un hospital y centro de investigación con sede en Río, comprobaron que en tres años habían tratado a 178 personas por bultos y lesiones supurantes similares, en su mayoría madres y abuelas. Casi todas mantenían un contacto cotidiano con los gatos. A raíz del análisis de las infecciones y de los gatos tratados en una clínica veterinaria cercana, descubrieron un hongo llamado *Sporothrix*.

Las especies de este género habitan en el suelo y en las plantas. El hongo penetra en el cuerpo a través de cortes o rasguños, donde adquiere forma de yema, con un aspecto que recuerda a una levadura. Nunca se había visto que fuese contagioso, hasta esta epidemia. Los gatos y sus cuidadores se infectaron del siguiente modo: al pelear, jugar o estornudar, los felinos se pasaron unos a otros las levaduras de las heridas y la saliva. Y contagiaron a las personas a través de las garras, los dientes y las caricias. La infección pasó entonces de la piel a los ganglios linfáticos y, de ahí, a los ojos y los órganos internos a través del riego sanguíneo. En informes de casos reunidos por médicos

brasileños, se describía la aparición de quistes fúngicos incluso en el cerebro de algunos infectados.

El protagonista fue catalogado como una especie nueva, *Sporothrix brasiliensis*. Hasta el 2004, 759 personas habían sido tratadas en la Fundación Cruz; en 2011, la cifra ascendía ya a 4100 personas. El año pasado se diagnosticó a más de 12.000 brasileños que ocupaban una franja de más de 4000 kilómetros de longitud. También se ha extendido por Paraguay, Argentina, Bolivia, Colombia y Panamá.

«La epidemia no dará cuartel. Está en expansión», asegura Flávio Queiroz-Telles, médico y profesor de la Universidad Federal de Paraná en Curitiba, que atendió su primer caso en 2011.

El modo en que se propagaba era un misterio: los gatos vagan de aquí para allá, pero no viajan miles de kilómetros. En los CDC, Chiller y sus colaboradores barajaban una respuesta. En Brasil y Argentina, la esporotricosis se ha detectado también en las ratas, aparte de en los gatos. Los roedores infectados pueden viajar como polizones en los contenedores marítimos de mercancías. Millones de contenedores circulan por los puertos del planeta cada día. En este mismo momento uno de esos hongos puede ir de camino a un país, en una rata enferma que al escapar del contenedor podría diseminar la infección por cualquier ciudad portuaria.

«En las ciudades densamente pobladas, donde abundan los gatos callejeros, se observa un aumento de los ejemplares gravemente enfermos que vagan sueltos», afirma John Rossow, veterinario de los CDC y seguramente una de las primeras personas en calibrar la amenaza que supone *Sporothrix* para el país. «Y como los estadounidenses somos incapaces de no prestar ayuda a un animal abandonado, me temo que veremos muchos contagios en personas.»

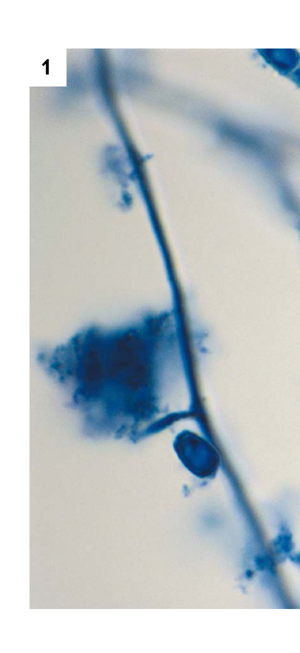
Para un micólogo como Chiller, la propagación es alarmante: el reino de los hongos se ha puesto en marcha, presionando contra los límites, en busca de cualquier posible ventaja que le permita encontrar nuevos hospedadores. Y tal vez nosotros les estemos echando una mano. «Los hongos están vivos, se adaptan», advierte. Entre los millones de especies existentes, «que sepamos, solo unas 300 causan enfermedades humanas —hasta ahora—. El margen posible para lo nuevo y lo diverso es vasto, en una clase de seres vivos que existe desde hace cientos de millones de años.»



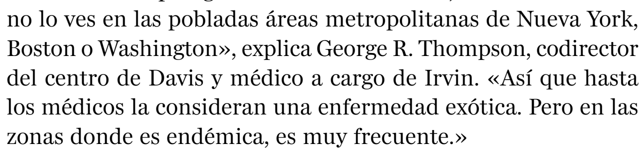
Torrence Irvin tenía 44 años cuando comenzaron sus problemas con los hongos. Corpulento y sano, antiguo practicante de atletismo en el instituto y la universidad, hoy reside en Patterson, un pueblo tranquilo del Valle Central de California. Hace poco más de dos años compró una casa en una urbanización flamante y se mudó con su esposa y sus dos hijas. Trabajaba como encargado de almacén de una cadena de decoración y era el locutor en los partidos del equipo juvenil de fútbol de la localidad.

En septiembre de 2018, contrajo lo que creía un resfriado de caballo, que no remitía. Tomó por su cuenta un antigripal, pero conforme pasaban las semanas, cada vez se sentía más débil y le faltaba el aliento. Un buen día, en octubre, se desmayó en el dormitorio de casa. Lo halló su mujer, que insistió en acudir a urgencias.

Los médicos pensaban que era neumonía. Recibió el alta con una pauta de antibióticos e instrucciones para tomar otros medicamentos sin receta en casa. Pero lejos de mejorar, siguió debilitándose y dejó de tolerar el alimento. Visitó otros médicos mientras no cesaba de empeorar, con disnea persistente, sudores nocturnos y adelgazamiento, signos similares a los que padecen los enfermos de cáncer. De 127 kilogramos se quedó en 68. Por fin, una prueba dio la respuesta: padecía coccidioidomicosis, vulgarmente conocida como fiebre del valle. «Nunca había oído hablar de ella», confiesa.


1

Pero otros sí. Le derivaron a la Universidad de California en Davis, a 160 kilómetros de casa, donde existe un centro especializado en la fiebre del valle. Esta enfermedad se concentra sobre todo en California y Arizona, el extremo sur de Nevada, Nuevo México y el oeste de Texas. Los microbios causantes, *Coccidioides immitis* y *C. posadasii*, infectan en torno a 150.000 habitantes de esa región cada año; apenas se conocen casos fuera de ella. «No es un patógeno de ámbito nacional, no lo ves en las pobladas áreas metropolitanas de Nueva York, Boston o Washington», explica George R. Thompson, codirector del centro de Davis y médico a cargo de Irvin. «Así que hasta los médicos la consideran una enfermedad exótica. Pero en las zonas donde es endémica, es muy frecuente.»

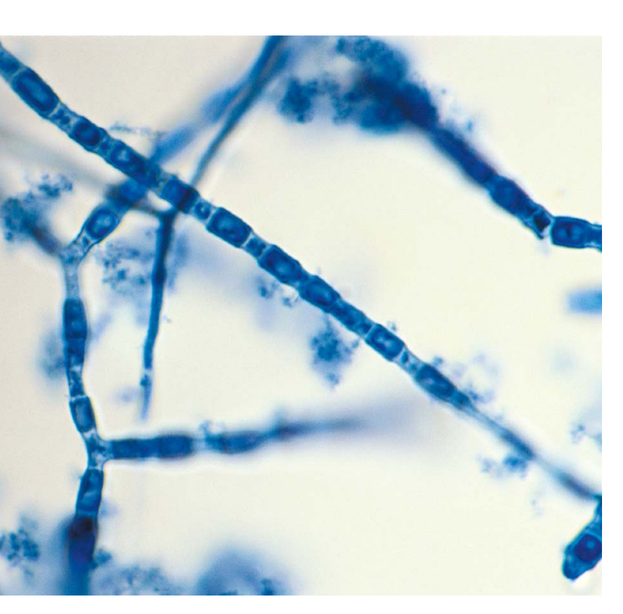


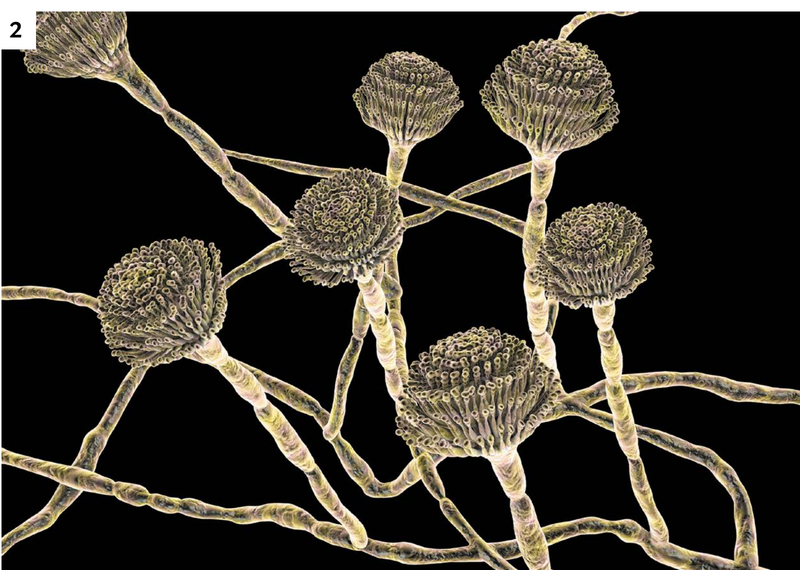
A semejanza de *Sporothrix*, *Coccidioides* posee dos formas. Una de ellas es filamentosa y frágil, habita en el suelo y se desintegra cuando este queda alterado. Las partículas livianas que se desprenden son arrastradas por el viento cientos de kilómetros. En algún momento de su vida en el Valle Central, Irvin había inhalado el hongo en esa forma. Y dentro del cuerpo se había transformado en esferas repletas de esporas que migraron por la sangre y penetraron en el cráneo y la columna vertebral. El organismo respondió produciendo tejido cicatricial que endureció y obstruyó los pulmones. Para cuando quedó al cuidado de Thompson, siete meses después del primer desmayo, su capacidad pulmonar se había reducido al 25 por ciento. Pese a poner en riesgo su vida (en uno de cada 100 casos el hongo desarrolla lesiones mortales en los órganos y en las membranas que rodean el encéfalo), Irvin tuvo suerte.

Irvin había recibido ya todos los tratamientos autorizados. Existen solo cinco clases de medicamentos antifúngicos, pocas en contraste con las más de veinte que existen de antibióticos. Tal escasez obedece en parte a lo difíciles que son de fabricar: las similitudes que las células fúngicas mantienen con las células humanas dificulta crear un fármaco que pueda erradicarlas sin perjudicarnos a nosotros.

La dificultad es tal que se tardan casi veinte años en diseñar una nueva clase de antifúngicos: en la década de 1950, se obtuvieron los polienos, como la anfotericina B; en los ochenta, los azoles; y, a partir de 2001, las equinocandinas, las más nuevas. (También están la terbinafina, usada sobre todo para infecciones externas, y la flucitosina, que se combina mayoritariamente con otros fármacos.)

A Irvin, nada acababa de funcionarle bien. «Me quedé en los huesos», recuerda. «Mi padre vino a visitarme y de la impresión tuvo que sentarse entre lágrimas. Mis hijas no querían verme.»





UN DÚO MORTÍFERO de hongos está infectando cada vez a más personas. *Coccidioides immitis* es el causante de la fiebre del Valle y se está propagando más allá del sudoeste de EE.UU., donde fue descubierto por primera vez (*1*). *Aspergillus fumigatus* parece colonizar multitud de ambientes y causa la muerte a personas aquejadas de gripe o COVID-19 (*2*).

Como último recurso, el equipo de Davis le administró olorofim. Este nuevo fármaco, fabricado en el Reino Unido y no comercializado hasta la fecha, contaba con un ensayo clínico abierto a pacientes en que hubieran fracasado todos los demás remedios. Irvin era un candidato claro. La mejora fue casi inmediata: comenzó a ganar peso, pudo ponerse en pie con ayuda de un andador y al cabo de unas semanas volvió a casa. La fiebre del Valle es ocho veces más frecuente hoy que hace veinte años. En ese lapso de tiempo ha aumentado la migración a la costa sudoeste y oeste del país, han crecido las urbanizaciones residenciales y la remoción del suelo, y el cambio climático ha hecho más árida la región. «*Coccidioides* es feliz cuando el suelo está húmedo; no esporula y no es especialmente infeccioso. Las esporas surgen durante las épocas de sequía. Y en la década anterior hemos sufrido una sequía intensa», explica Thompson.

Dado que la fiebre del Valle ha sido siempre una enfermedad propia del desierto, los científicos creían que permanecería confinada en esas zonas. Pero eso está cambiando. En 2010, tres personas contrajeron la enfermedad en el oeste del estado de Washington, 1500 kilómetros al norte, donde llueve en abundancia: un niño de 12 años que había jugado en un cañón y había inhalado esporas; otro de 15 años que cayó de un todoterreno y la contrajo a través de las heridas; y un obrero de la construcción de 58 años, al que le afectó el cerebro. Un artículo publicado en 2019 indica que los casos así podrían convertirse en algo habitual. Morgan Gorris, geóloga del Laboratorio Nacional de Los Álamos, usa simulaciones del calentamiento global para predecir qué regiones de EE.UU. podrían volverse acogedoras para *Coccidioides* a finales de este siglo. En el supuesto de un aumento máximo de la temperatura, la superficie con condiciones propicias para la fiebre (temperatura media anual de 10,7 ºC y precipitación media anual inferior a 600 milímetros) alcanzaría la frontera de Canadá y abarcaría la mayoría del oeste del país.

Irvin ha tardado casi dos años en restablecerse; aún toma seis píldoras diarias de olorifim y tal vez tenga que hacerlo de forma indefinida. Ha recuperado peso y fuerza, pero los pulmones han sufrido secuelas permanentes y ha quedado incapacitado para trabajar. «Estoy aprendiendo a vivir con ello el resto de mi vida.»

Sporothrix ha encontrado un nuevo modo de transmisión. La fiebre del Valle se ha propagado más allá de sus límites. *C. auris*, el hongo que se aprovechó de la COVID-19, ha protagonizado una argucia similar y explotado nichos abiertos por el caos de la pandemia.

Ya se sabía antes de las malas tretas de ese hongo, pues no se comportaba como las demás levaduras patógenas: permanecía en quiescencia en el intestino hasta que el sistema inmunitario quedaba debilitado, momento en que irrumpía en la sangre y las mucosas. En algún momento de la primera década de este siglo, *C. auris* adquirió la capacidad de contagio de una persona a otra. Se había adaptado a sobrevivir sobre el metal, el plástico y las superficies rugosas de tela y papel. Cuando el primer brote de COVID-19 causó una escasez de mascarillas y batas desechables, los sanitarios se vieron obligados a reutilizar el equipo que solían desechar después de atender a cada paciente para evitar el contagio de infecciones. Y *C. auris* aprovechó esa oportunidad.

En Nueva Delhi, la médica y microbióloga Anuradha Chowdhary leyó los primeros casos clínicos y quedó conmocionada por el hecho de que la COVID-19 pareciera ser no solo una enfermedad respiratoria, sino también inflamatoria. La rutina médica habitual dicta abatir el sistema inmunitario con corticoesteroides para rebajar la inflamación. Pero se percató de que esto expondría a los pacientes a los hongos invasores. *C. auris*, mortal y persistente, ya había sido detectado en hospitales de 40 países de los cinco continentes. Si el personal sanitario propagaba inadvertidamente el microbio por todo el hospital en la indumentaria reutilizada, habría un estallido.

«Pensé: “Dios mío, las UCI acabarán llenas de pacientes y los programas de control de infecciones estarán en riesgo”», explicó la experta hace poco. «Si *C. auris* llega a las UCI, causará estragos.»

Chowdhary lanzó la voz de alarma en una revista médica al inicio de la pandemia. Pero en pocos meses tuvo que escribir una actualización: *C. auris* había invadido una UCI de 65 camas en Nueva Delhi, y dos tercios de los afectados, que contrajeron la levadura tras su ingreso por la COVID-19, habían fallecido. En EE.UU., el comunicado que Chiller recibió señalaba varios cientos de casos en hospitales y residencias de enfermos crónicos de Los Ángeles y del cercano condado de Orange; en un solo hospital de Florida daba a conocer 35 casos. Y donde se habían notificado pocos, los expertos de los CDC supusieron que debía haber más; sospechaban que los análisis ordinarios para detectar la propagación silenciosa del microbio habían sido suspendidos por la sobrecarga asistencial que imponían los pacientes de la pandemia.

Por si ello fuera poco, los médicos especialistas en micosis estaban atentos ante una amenaza aún más grave si cabe: la propagación de otro hongo al que la COVID-19 podría allanar el camino.

Aspergillus fumigatus actúa en la naturaleza como una cuadrilla de limpieza. Acelera la putrefacción de la materia vegetal y evita que todo quede cubierto de plantas muertas y hojas caídas. Pero en medicina es conocido por causar infecciones oportunistas, que surgen cuando el sistema inmunitario debilitado no puede destruir las esporas de *Aspergillus*. En las personas enfermas de antemano, la mortalidad por la aspergilosis invasora raya el cien por cien.

Durante la pandemia de gripe aviar H1N1 de 2009, *Aspergillus* ya encontró víctimas propicias: personas griposas, por lo demás sanas. A algunos hospitales holandeses comenzaron a acudir pacientes engripados con insuficiencia respiratoria y al borde de un choque. Murieron a los pocos días. En 2018, la llamada aspergilosis pulmonar invasora ya afectaba a uno de cada tres pacientes críticos con gripe y mataba hasta los dos tercios de ellos.

Y entonces apareció el coronavirus. Este erosiona el interior de los pulmones del mismo modo que la gripe. Las redes de alerta que conectan a los infectólogos y los micólogos de todo el mundo comenzaron a activarse debido a los casos de aspergilosis en enfermos de COVID: en China, Francia, Bélgica, Alemania, Países Bajos, Austria, Irlanda, Italia e Irán. Las complicaciones causadas por *C. auris* son graves, pero *Aspergillus* es peor. El primero pulula en los hospitales, mientras que el segundo está presente en todas partes. No hay modo de acabar con las esporas ni de impedir que las respiremos.

En Baltimore, Kieren Marr era plenamente consciente del peligro. Esta profesora de medicina y oncología del Centro Médico Johns Hopkins dirige la unidad de infecciones en enfermos trasplantados y oncológicos de la institución. Conoce bien las infecciones que afectan a los receptores de órganos y médula ósea. Cuando la COVID-19 llegó, estaba preocupada por si surgía *Aspergillus* y los hospitales estadounidenses, inconscientes de la amenaza, lo pasaran por alto. La Johns Hopkins comenzó a analizar a pacientes con COVID-19 ingresados en la UCI con el tipo de pruebas moleculares de diagnóstico usadas en Europa, en un intento por detectar y tratar a tiempo la infección. En los cinco hospitales que la red Johns Hopkins gestiona, se comprobó que una de cada 10 personas con COVID-19 grave estaba contrayendo aspergilosis.

Varios pacientes habían fallecido, entre ellos uno con aspergilosis cerebral. Marr temía que hubiese muchos más casos como él por todo el país que no se estuviesen detectando a tiempo. «Son malas noticias, porque *Aspergillus* es ahora mismo más importante en la COVID-19 que lo es *C. auris*. No cabe duda alguna», afirmaba esta primavera.

ESPECIES DE HONGOS QUE EXISTEN:
5 MILLONES

ESPECIES QUE CAUSAN ENFERMEDADES HUMANAS:
300

El desafío a la hora de combatir a los hongos patógenos no solo estriba en su virulencia o el carácter furtivo, por negativos que puedan ser estos atributos. Reside en que los hongos se han vuelto resistentes a los fármacos que administramos para acabar con ellos.

Sucede algo parecido a lo que ocurre con la resistencia a los antibióticos. Los fabricantes de fármacos intentan siempre adelantarse a las maniobras evolutivas que las bacterias usan para neutralizar los medicamentos. En los hongos, el relato es el mismo, pero peor. Los hongos patógenos adquieren resistencia a los antifúngicos, de los que no disponemos en tanta cantidad, pues hace relativamente poco que somos conscientes de la amenaza.

«En el cambio de siglo, cuando pasé del mundo universitario al sector farmacéutico, no había ningún antifúngico en fase de desarrollo», asegura John H. Rex, médico y veterano en la búsqueda de nuevos antibióticos. También es director médico de F2G, la empresa que fabrica el fármaco experimental que tomó Torrence Irvin. «En todo el mundo no había un solo antifúngico que estuviese en fase de ensayo clínico, ni siquiera en fase preclínica.»

Ahora ya no es así, pero las investigaciones avanzan con lentitud. Como ocurre con los antibióticos, el beneficio económico de sacar un nuevo medicamento al mercado es incierto. Pero el desarrollo de nuevas especialidades es fundamental, porque los pacientes a veces necesitan tomarlas durante meses, incluso años, y muchos antifúngicos actuales son tóxicos. (Son conocidos los importantes efectos secundarios de la anfotericina B.) «Como médico, uno tiene que decidir tratar la infección a expensas de los riñones del paciente. Si no la trata, sabe que este morirá», sentencia Ciara Kennedy, presidenta y directora ejecutiva de Amplyx Pharmaceuticals, empresa que está diseñando un nuevo antifúngico.

El desarrollo de nuevos medicamentos es esencial porque los disponibles están perdiendo eficacia. Irvin acabó participando en el ensayo del olorofim porque la coccidioidomicosis que sufría no respondía a ningún fármaco. *C. auris* ya muestra farmacorresistencia a componentes de las tres grandes clases de antifúngicos. *Aspergillus* está adquiriendo cada vez mayor resistencia a los antifúngicos que son más eficaces en su caso, los azoles, porque ha estado expuesto a ellos de forma persistente. Estos últimos se usan en todo el mundo, no solo en la agricultura como plaguicidas, sino en pinturas, plásticos y materiales de construcción.

El mejor modo de combatir los estragos de los hongos no reside en el tratamiento, sino en la prevención. Es decir, en las vacunas. Ahora mismo no existe ninguna vacuna contra las micosis. Pero los problemas que entraña el tratamiento prolongado con fármacos que son tóxicos, sumada a la incidencia alarmante de nuevos casos, convierten este asunto en una cuestión de urgencia. Y, por primera vez, una vacuna podría estar a la vista, si no al alcance de la mano.

La razón por la que la incidencia de la fiebre del Valle no es mayor de lo que es, cuando el 10 por ciento de la población de EE.UU. reside en la región donde es endémica, es que quien supe-

ra la infección queda inmunizado de por vida. Este hecho indica que una vacuna podría ser factible, un objetivo que se persigue desde los años cuarenta del pasado siglo. En los años ochenta, un prototipo basado en una versión inactivada de la forma que Coccidioides adopta dentro del cuerpo (esferas repletas de esporas) funcionó de manera extraordinaria en ratones, pero fracasó estrepitosamente en un ensayo clínico con pacientes.

«Lo hicimos con un presupuesto magro, pero todo el mundo quiso participar», relata John Galgiani, que formó parte de esa investigación. Hoy es profesor y director del Centro de la Fiebre del Valle, dependiente de la Facultad de Medicina de la Universidad de Arizona. «A pesar de las reacciones [adversas] y los tres años de duración, el 95 por ciento de los enfermos no abandonaron el estudio.»

Y aquí es donde hacen acto de presencia los perros. Como meten el hocico en todos lados, están más expuestos a contraer la fiebre del Valle que los humanos. En varios condados de Arizona, cerca del 10 por ciento de la población canina contrae la enfermedad cada año, y tienen más probabilidades de sufrir una infección pulmonar grave que las personas. La infección les provoca un sufrimiento terrible y requiere un tratamiento largo y costoso. Pero su vulnerabilidad, sumada a las menores exigencias que los organismos sanitarios nacionales imponen para aprobar los medicamentos veterinarios, en contraste con los destinados a uso humano, los convierte en un modelo de ensayo de posibles vacunas. Además, el gran cariño que tienen los propietarios por sus mascotas y la predisposición a desembolsar dinero de su bolsillo podrían convertir la posibilidad en realidad por primera vez.

Galgiani y su grupo de Arizona están trabajando en una nueva fórmula vacunal, gracias a las donaciones de cientos de propietarios caninos; a estas se suma una asignación concedida por los Institutos Nacionales de Salud (NIH) y la colaboración comercial de una empresa californiana, Anivive Lifesciences. Los ensayos con la vacuna no han acabado, pero pronto podría salir al mercado, el año que viene. «Es una prueba preliminar sobre la viabilidad de una vacuna antifúngica. Administrada a perros, se ha comprobado su seguridad», afirma Lisa Shubitz, veterinaria e investigadora en el centro de Arizona. «Estoy convencida de que estamos en el buen camino hacia la vacuna humana.»

La inyección no contiene un hongo muerto, sino una versión viva desprovista de un gen esencial para la reproducción, el *CPS1*. El hongo es, pues, incapaz de multiplicarse. El gen fue descubierto por un equipo de fitopatólogos y después identificado en *Coccidioides* por Marc Orbach, de la Universidad de Arizona, especialista en las interacciones entre hospedadores y patógenos. Después de crear un *Coccidioides* mutante carente del gen, él y Galgiani infectaron a ratones de laboratorio que habían sido seleccionados para ser sumamente vulnerables al hongo. El contacto con el microbio desató una potente reacción inmunitaria, con la activación de los linfocitos T cooperadores del tipo 1 (Th1), que crean una inmunidad duradera. Los roedores sobrevivieron seis meses sin mostrar ningún síntoma de la coccidioidomicosis, pese a varios intentos de infectarlos con *Coccidioides* inalterados. En las autopsias practicadas al final del semestre, casi no hallaron rastro del hongo en los pulmones. Esa dilatada protección convierte al hongo mutante en el candidato más prometedor para una vacuna desde los trabajos de Galgiani de los años ochenta. Pero convertir una vacuna canina en otra apta para el ser humano no será coser y cantar.

La fórmula canina es competencia del Ministerio de Agricultura de EE.UU., pero la aprobación de la versión humana dependerá de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA). Esta exigirá ensayos clínicos que seguramente durarán años, en los que tendrán que participar miles de personas, y no la pequeña cantidad de animales con que se valida la fórmula canina. Y a diferencia del prototipo de hace cuarenta años, la nueva vacuna contendría un microbio vivo. Como nunca se ha aprobado una vacuna contra hongos, no existe ningún protocolo de evaluación conocido que puedan seguir sus creadores ni las autoridades reguladoras. «Tendríamos que pilotar el avión al tiempo que lo fabricamos», concluye Galgiani.

El experto calcula que la vacuna humana contra la coccidioidomicosis exigirá entre cinco y siete años y costará unos 150 millones de dólares, una inversión arriesgada desde la perspectiva del rendimiento económico. Pero, de ser eficaz, tendría una gran utilidad, pues protegería tanto a los residentes permanentes del sudoeste como al personal militar de 120 bases y otras instalaciones situadas en la zona endémica, además de a cientos de miles de norteños que la visitan cada invierno. Un cálculo cifra en 1500 millones de dólares anuales el ahorro en gastos sanitarios que reportaría la vacuna.

«Hace una década no vislumbraba la posibilidad de contar con una vacuna, pero ahora sí», asegura Galgiani.

La primera vacuna antifúngica allanaría el camino a las siguientes. Si la vacunación culminase con éxito —desde el punto de vista científico, ya que las autoridades sanitarias y la población tendrían que estar dispuestas a aceptarlas—, ya no necesitaríamos estar en guardia permanente contra el reino de los hongos. Podrían convivir junto a nosotros y en nuestro interior, de forma segura y con confianza, sin miedo a los estragos que pudieran causar.

Pero quedan años para eso, y los hongos ya se están moviendo ahora mismo: cambian de hábitos, alteran su distribución y aprovechan las emergencias como la COVID para hallar nuevas víctimas. Chiller, el especialista de los CDC, no oculta su preocupación.

«Creo que en el último lustro hemos asistido a un fenómeno radicalmente nuevo, un comportamiento de los hongos al que no estábamos acostumbrados», afirma. «¿Cómo nos mantendremos al acecho? ¿En qué debemos indagar para saber lo que vendrá después? Esas emergencias no se estudian como mero ejercicio intelectual, sino porque revelan lo que podría estar en ciernes. Hemos de estar preparados ante nuevas sorpresas.» IyC

PARA SABER MÁS

Burden of serious fungal infections in Spain. Juan L. Rodríguez-Tudela et al. en *Clinical Microbiology and Infection*, vol. 21, págs. 183-189, febrero de 2015.

Candida auris: A global fungal public health threat. Jacques F. Meis y Anuradha Chowdhary en *The Lancet Infectious Diseases*, vol. 18, págs. 1298-1299, diciembre de 2018.

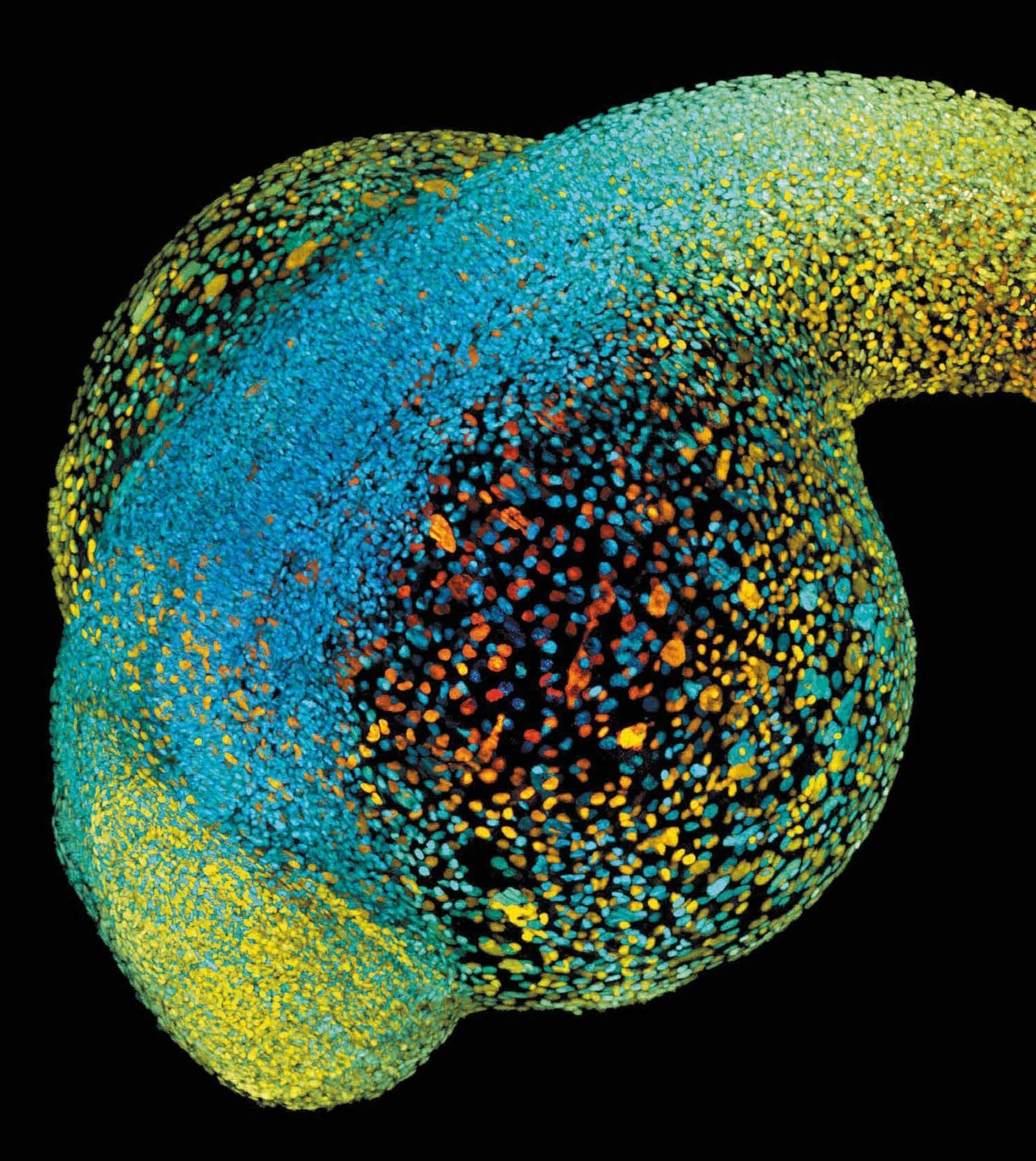
Expansion of coccidioidomycosis endemic regions in the United States in response to climate change. Morgan E. Gorris et al. en *GeoHealth*, vol. 3, págs. 308-332, octubre de 2019.

Aspergillosis complicating severe coronavirus disease. Kieren A. Marr, et al. en *Emerging Infectious Diseases*, vol. 27, págs. 18-25, enero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Micosis: Los hongos invisibles y las enfermedades que provocan. Guillermo Quindós Andrés en el blog *MikroSphera*, 1 de junio de 2015.

¿Cómo podría estar afectando un clima más cálido a la propagación de enfermedades parecidas a la COVID-19? Sara Goudarzi en www.investigacionyciencia.es, 11 de mayo de 2020.



BIOLOGÍA CELULAR

Fuerzas celulares que moldean la vida

Cada vez hay más pruebas de que las fuerzas mecánicas resultan muy decisivas para un organismo, desde el embrión hasta el adulto

Amber Dance

LOS ESTUDIOS CON EMBRIONES, como el de este pez cebra, han ayudado a comprender la relevancia de las fuerzas en la biología.

Amber Dance, doctora en biología, es periodista científica especializada en microbiología, biología celular, neurociencia y técnicas de laboratorio.





l principio, un embrión no tiene frente ni espalda, ni cabeza ni cola: no es más que una mera esfera de células. Pero ese amontonamiento homogéneo comienza a cambiar muy pronto: se acumula líquido en su interior, las células fluyen como la miel para tomar posiciones de cara al futuro cuerpo, y las láminas celulares se pliegan como en la papiroflexia para construir un corazón, un intestino o un cerebro.

No ocurriría nada de esto sin las fuerzas que, para dar forma al animal en desarrollo, lo aprietan, lo doblan y lo estiran. Incluso al alcanzar la madurez, sus células siguen respondiendo a los empujones y tirones que se dan entre sí, o que les llegan desde el entorno.

Según la bióloga del desarrollo Amy Shyer, que estudia la morfogénesis en la Universidad Rockefeller, en Nueva York, la manera en que se moldean los cuerpos y los tejidos sigue siendo «una de las cuestiones más importantes y menos conocidas de nuestra época». Durante décadas, los biólogos se han centrado en cómo va tomando forma un organismo gracias a los genes y a otras biomoléculas, sobre todo porque las herramientas para analizar estas señales son de fácil acceso y están en constante mejora. A las fuerzas mecánicas se les ha prestado mucha menos atención.

Para el mecanobiólogo Xavier Trepat, del Instituto de Bioingeniería de Cataluña, en Barcelona, centrarse únicamente en los genes y las biomoléculas es «como si intentáramos escribir un libro solo con la mitad de las letras del alfabeto».

A lo largo de los últimos veinte años, se ha comenzado a tener en cuenta la mecánica en una serie de órganos, de organismos y de etapas del desarrollo. Se empiezan a definir los procesos celulares que generan fuerzas, así como los que permiten percibirlas y responder a ellas. Y todo gracias a la invención de herramientas y estrategias diseñadas exprofeso, con la incorporación de láseres y micropipetas, partículas magnéticas y microscopios fabricados a medida. La mayoría de las investigaciones exploran las señales mecánicas en una placa con un cultivo de células o tejidos. Pero hay quienes prefieren utilizar los animales enteros y a veces detectan que han actuado principios diferentes de los que parecen intervenir en los tejidos aislados. El biólogo del desarrollo Roberto Mayor, del Colegio Universitario de Londres, nos comenta que estos estudios in vivo plantean numerosos desafíos (como la medición de fuerzas diminutas en tejidos complejos), pero son la clave para interpretar la misión de las fuerzas a la hora de esculpir la vida.

A medida que un puñado de científicos tenaces va venciendo los retos, se va topando con las fuerzas cruciales que dan forma a los seres vivos, desde el inicio de las etapas embrionarias hasta la aparición de las enfermedades que los castigarán más tarde. En el futuro, esta información servirá para diseñar mejores tratamientos para ciertos problemas, como la infertilidad o el cáncer.

Según el biólogo del desarrollo Thomas Lecuit, del Instituto de Biología del Desarrollo de Marsella, «las fuerzas operan cada vez que hay que tallar una forma».

FUERZAS DESDE EL PRINCIPIO

Antes de que un embrión tome forma, tiene que romper la simetría de la bola homogénea de células. Después de adentrarse en los controles genéticos y químicos que guían este proceso, los científicos empiezan ahora a vislumbrar mejor los mecanismos. El biólogo Jean-Léon Maître, del Instituto Curie, en París, afirma que «poco a poco va aflorando la imagen completa sobre

EN SÍNTESIS

Durante tiempo se había pensado que el desarrollo de los órganos y el cuerpo estaba dirigido principalmente por los genes y otras biomoléculas. No obstante, en los últimos veinte años ha comenzado a tenerse en cuenta la influencia de las fuerzas mecánicas en las células.

Se han descubierto así fuerzas cruciales que dan forma a los seres vivos y que intervienen desde las primeras etapas del desarrollo embrionario hasta fases posteriores en las que aparecen enfermedades.

Conocer con detalle el modo en el que actúan las fuerzas en distintos procesos servirá para diseñar mejores tratamientos para ciertos problemas, como la infertilidad o el cáncer.

PÁGINAS ANTERIORES: PHILIPP KELLER/HHMI JANELIA RESEARCH CAMPUS

la intervención de las fuerzas mecánicas en el desarrollo». Por ejemplo, las propiedades físicas, como la presión hidráulica y la densidad celular, se vuelven decisivas a medida que el embrión de los mamíferos va organizando la parte frontal, la espalda, la cabeza y la cola.

El grupo de Maître está investigando la bola inicial de células que conforman el embrión murino para saber cómo aparece la enorme cavidad llena de líquido denominada blastocele. A medida que este se llena, las células que se convertirán en el feto se van amontonando en un lateral. Esta primera rotura de la simetría garantiza la correcta implantación del embrión en la pared del útero y también controla tanto el lado del embrión que será la espalda como el que se convertirá en la tripa. Lo que no quedaba claro era cómo se creaba y colocaba el blastocele.

Cuando Maître y su equipo se pusieron a fotografiar cada detalle del proceso, hallaron algo inesperado: «Vimos que se formaban burbujitas, pequeños embolsamientos de agua, entre las células. Eran transitorias, por lo que solo se detectaban cuando las imágenes se tomaban con bastante rapidez». El líquido de las burbujas procedía del que rodeaba al embrión, y entraba empujado por la elevada concentración de moléculas de agua del exterior. A continuación, observaron que el agua de las burbujas fluía hacia el enorme hueco del blastocele, y Maître cree que probablemente se cuele por los huecos intercelulares.

Confirmaron que era así cuando examinaron las proteínas que se despliegan hacia el espacio intercelular para acoplarse unas a otras y estrechar así el contacto entre las células para mantenerlas bien pegadas. A medida que aparecían las burbujas, las proteínas de adhesión parecían despegarse debido al empuje que separaba a las células; la separación resultaba más fácil cuantas menos proteínas de este tipo tuvieran.

Según Maître, es la primera vez que se observa que el embrión se moldea gracias a la rotura de las conexiones intercelulares con un líquido a presión. ¿Por qué tienen que separarse a la fuerza las células para construir un embrión? Al fin y al cabo, este proceso, además de ineficaz, conlleva riesgos. Maître imagina que la estrategia no ha evolucionado por ser la mejor solución, sino por ser «suficientemente buena». Dado que su equipo estudia la mecánica de las células del embrión humano, espera que estos conocimientos ayuden a identificar los embriones que pueden implantarse para que el embarazo prosiga con éxito en la fecundación in vitro.

En las etapas posteriores del desarrollo, el embrión rompe la simetría en direcciones opuestas para diferenciar la cabeza de la cola. El biofísico Otger Campàs, que se formó en la Universidad de Barcelona y hoy es profesor de la Universidad de California en Santa Bárbara, se centró en el crecimiento de la cola en los embriones del pez cebra (*Danio rerio*). Su grupo midió las fuerzas implicadas mediante la inyección de gotitas de aceite cargadas con nanopartículas magnéticas en el espacio intercelular. A continuación, aplicaron un campo magnético para deformar las gotitas, con lo que lograron medir cómo reaccionaban los tejidos al empuje.

Se percataron de que la punta de la cola en crecimiento presentaba un estado que los físicos denominan «fluido»: las células se movían con libertad por el tejido que, cuando era presionado, se deformaba con facilidad. Cuanto más se alejaban del extremo de la cola, más rígido se volvía el tejido. «Sabíamos que se estaba solidificando, pero desconocíamos el mecanismo», recuerda Campàs.

No había nada entre las células que aportara la rigidez, ni tan siquiera moléculas que formaran una matriz estructural. Pero cuando midieron las separaciones intercelulares, observaron que eran muy amplias en la punta blanda de la cola y mucho más reducidas cerca de la cabeza. A medida que se aglomeraban, el tejido se solidificaba. Campàs compara esta transición con el envasado al vacío del café: los granos se mueven con libertad al introducirlos en el envase, pero con el vacío acaban tan estrechamente unidos que el envase lleno parece un ladrillo. Planea investigar si este mecanismo interviene en la formación de otras estructuras embrionarias, como las yemas de las extremidades.

FORMACIÓN DEL CORAZÓN Y DEL CEREBRO

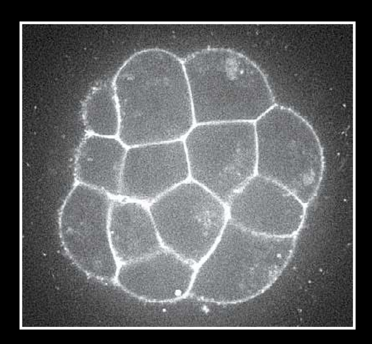
Una vez que el embrión en desarrollo ha trazado su propio plan, comienzan a formarse los órganos. Con la excepción del intestino, «en esencia, conocemos muy poco sobre la formación

FUERZAS EN EL EMBRIÓN

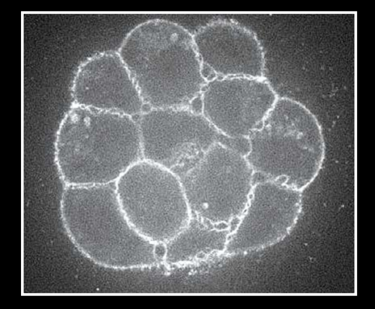
Desarrollo bajo presión

Los embriones de los mamíferos se esculpen gracias a la fuerza de las burbujas de agua a presión. Los embriones distribuyen las células en torno a una cavidad en la que se confinan las que se convertirán en el feto. Las burbujas que aparecen y se fusionan entre sí dirigen el proceso.

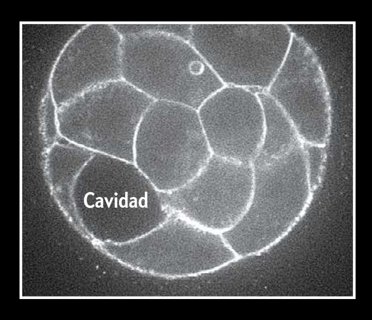
El embrión comienza como una masa esférica y compacta de células.



Entre las células se forman burbujas de agua, lo que fragmenta el embrión.



Las burbujas comienzan a agregarse en una única cavidad grande que deja las futuras células del feto a un lado.



FUENTE: «HYDRAULIC FRACTURING AND ACTIVE COARSENING POSITION THE LUMEN OF THE MOUSE BLASTOCYST» POR JULEN G. DUMORTIER, ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 365, PÁGS. 465-468, AGOSTO DE 2019.

de los órganos internos», señala Timothy Saunders, biólogo del desarrollo de la Universidad Nacional de Singapur.

Pero todo esto ha empezado a cambiar. El grupo de Saunders, por ejemplo, examinó la formación del corazón en los embriones de *Drosophila* (la mosca de la fruta) y halló un acontecimiento crucial: dos fragmentos de tejido se unen para formar el tubo que finalmente se convertirá en el corazón. Cada parte contiene dos tipos de miocardiocitos que han de encajar correctamente para que aparezca un corazón sano. Saunders observó que a menudo se producía un mal encaje entre ambos, que más tarde se corregía. ¿Qué llevaba a esa corrección?

El desencadenante resultó ser una fuerza interna de las propias células cardíacas. Se sabía que la miosina II (proteína emparentada con la implicada en la contracción de las fibras musculares) se desplazaba entre el centro y el borde de las células, de ida y vuelta, cuando estas intentaban encajarse entre sí. El por entonces estudiante de doctorado Shaobo Zhang (en la actualidad aspirante a una plaza posdoctoral en la Universidad de California en San Francisco) se preguntó si la miosina podría crear una fuerza que tirara de las células emparejadas para desmontar todo encaje erróneo.

Para comprobar su teoría, Zhang utilizó un láser para rebanar las células emparejadas y vio que se separaban inmediatamente, como cuando se corta una goma elástica tirante. «Observamos un bonito rebote», explica Saunders. Pero cuando el equipo rebanó células que carecían de miosina II, «no pasaba nada de nada». Igual que cuando los dedos tensan un elástico, la miosina creaba desde dentro la fuerza que tiraba de las conexiones. De esta forma, al desbaratar los contactos entre las células que no se encajan correctamente, se les da otra oportunidad para que se emparejen con la compañera correcta.

La simple proliferación celular puede también guiar la distribución adecuada de las células, como descubrió el equipo dirigido por el biofísico Kristian Franze, de la Universidad de Cambridge, en embriones de rana de uñas, del género *Xenopus*. Sabían que, a medida que se conectan el ojo y el cerebro, las neuronas oculares extienden los axones (largas proyecciones que utilizan estas células para ponerse en contacto entre sí) a través de una ruta definida gracias a la rigidez del tejido cerebral. De esta forma, los axones siguen los tejidos más blandos hacia un concentrador de conexiones en el centro del cerebro en desarrollo.

Para determinar cuándo y cómo se forma la ruta, el equipo utilizó un microscopio hecho a medida con el cual conseguían observar el proceso in vivo a la vez que medían la rigidez del tejido con una sonda diminuta. Observaron que el gradiente de rigidez aparece unos 15 minutos antes que los axones, según describe Franze, que también dirige el Instituto de Física Médica e Ingeniería Microtisular de la Universidad de Erlangen-Nuremberg.

¿Cómo se forma el gradiente? Al igual que en la cola del pez cebra en desarrollo, el tejido más rígido del cerebro de la rana parecía contener una mayor densidad de células. Cuando el equipo bloqueó la división celular en los embriones en desarrollo, no aparecía el gradiente de rigidez y los axones avanzaban descaminados. El empaquetamiento de las células en un espacio confinado parece ser un modo rápido y eficaz de guiar las conexiones que han de formarse en el sistema nervioso.

LA PRESIÓN CONTINÚA

Los animales totalmente desarrollados también deben lidiar con las fuerzas mientras sigan creciendo o afronten una enfermedad. Por ejemplo, cuando un cuerpo se expande, la piel ha de crecer para recubrirlo. Los cirujanos lo aprovechan para la reconstrucción de una mama, donde se necesita más piel para cubrir el implante planeado. Primero insertan un «globo» y lo inflan poco a poco con solución salina durante varios meses para estirar la piel existente, hasta que haya crecido suficiente piel nueva y se garantice el éxito de la siguiente intervención quirúrgica.

FUERZAS EN TUMORES

La mecánica del cáncer de piel

Las fuerzas físicas explican por qué algunos tumores son benignos y otros consiguen diseminarse.

TUMORES NO INVASIVOS

Los carcinomas basocelulares presionan la membrana basal, pero al hacerlo la engrosan, lo que amortigua su crecimiento.

Fuerza

Crecimiento y aglomeración de las células cancerosas

Membrana basal

Los tumores forman protuberancias que rara vez se abren camino hacia el torrente circulatorio.

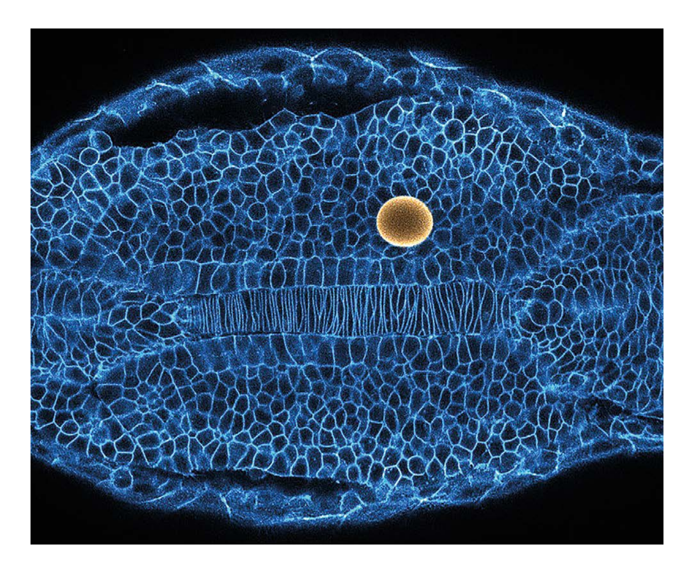
TUMORES INVASIVOS

Los carcinomas epidermoides construyen una capa externa rígida de células ricas en queratina que presiona los tumores, y presentan una membrana basal más delgada.

Capa rígida de queratina

A medida que se expanden estos tumores, se pliegan en vez de sobresalir, con lo que aumenta la tensión y acaban rebasando la membrana basal.

FUENTE: «MECHANICS OF A MULTILAYER EPITHELIUM INSTRUCT TUMOUR ARCHITECTURE AND FUNCTION», POR VINCENT F. FIORE ET AL. EN *NATURE*, 585, PÁGS. 433-439, SEPTIEMBRE DE 2020.



PARA EMPUJAR Y TIRAR de las células de este embrión de pez cebra, los científicos deforman una gota cargada de nanopartículas magnéticas (*amarillo*) mediante la aplicación de un campo magnético.

ALESSANDRO MONGERA Y OTGER CAMPÀS, UC SANTA BÁRBARA

Pero ¿cómo responden las células de la piel a esa presión y cómo se multiplican? La bióloga especializada en células madre Mariaceleste Aragona abordó el problema cuando hacía un posdoctorado en la Universidad Libre de Bruselas junto a Cédric Blanpain. Implantó un gránulo de hidrogel autoexpandible bajo la piel de unos ratones. La piel se fue estirando a su alrededor a medida que el hidrogel adsorbía líquido, hasta alcanzar un volumen final de 4 mililitros. En menos de un día, Aragona observó que comenzaban a multiplicarse las células madre de debajo de la epidermis, lo que proporcionó el material bruto que se diferenció posteriormente en una nueva piel.

Pero no todas las células madre proliferaron en respuesta a este estiramiento, ya que solo una subpoblación, antes indefinida, comenzó a multiplicarse. «Seguimos sin saber el porqué», comenta Aragona, actualmente en la Universidad de Copenhague. Blanpain añade que, si lográramos averiguarlo, podríamos diseñar métodos que estimularan el crecimiento de la piel para la reconstrucción quirúrgica o la cicatrización de heridas.

Las propiedades mecánicas de los tejidos también intervienen en el crecimiento celular anómalo, como en el cáncer. Trepat nos recuerda que «los tumores sólidos son más rígidos que los tejidos normales» debido, en parte, al exceso de matriz extracelular (la malla de fibras que rodea las células). Pero también se debe a la propia proliferación de las células cancerosas. Y añade que «la rigidez hace que estas sean más malignas»; si se lograra saber el motivo, podrían desarrollarse tratamientos que cambiaran dichas propiedades físicas y redujeran la peligrosidad de los tumores.

En un estudio relacionado, los investigadores de la Universidad Rockefeller han identificado las fuerzas mecánicas que explican por qué algunos tumores de piel son benignos y otros malignos. Las células madre de la piel dan lugar a dos tipos de cáncer: el carcinoma basocelular, que no se extiende más allá de la piel, y el carcinoma epidermoide (o escamoso), que es invasivo. Los dos comprimen la membrana basal subyacente, una capa de proteínas estructurales que hace de frontera entre las capas externas de la piel y el tejido más profundo. El carcinoma basocelular benigno rara vez la atraviesa, pero su compañero más agresivo a menudo logra abrirse camino para viajar por la vasculatura y alojarse en otras partes del cuerpo.

En sus trabajos con ratones, Elaine Fuchs y Vincent Fiore, biólogos especializados en células madre, descubrieron que el tumor de piel benigno construía una membrana basal más gruesa y blanda, y esta sujetaba las células tumorales a medida que la presionaban hacia abajo, igual que un guante de goma. En cambio, el tumor agresivo favorecía la formación de una membrana basal más delgada.

Cualquier fuerza ejercida desde arriba también ayuda a que se escapen los tumores invasivos. Los carcinomas epidermoides construyen una capa rígida de células dérmicas diferenciadas denominada perla de queratina (o perla córnea). Al presionar sobre la parte superior del carcinoma, la perla contribuye a que el tumor rebase la frágil membrana basal igual que un puño atraviesa un cristal.

Según Fuchs, antes de este estudio se suponía que las células de la piel diferenciadas, con una identidad fija, no podían producir fuerzas mecánicas. En su opinión, esto ha constituido la principal sorpresa del trabajo.

Fuchs y Fiore planean investigar cómo perciben las células estas fuerzas mecánicas y cómo las convierten en un programa de expresión génica que lleva a producir más membrana basal o a favorecer la diferenciación.

Para el biólogo del desarrollo Alan Rodrigues, de la Universidad Rockefeller, la clave reside en cómo se conectan las fuerzas y los genes. Y no solo tiene relevancia para el cáncer de piel. «La cuestión esencial de la mecánica está en conocer cómo se relaciona realmente con las moléculas», apunta.

Otros científicos están explorando también esta conexión. «Sabemos que ni “los genes lo hacen todo” ni “la mecánica lo hace todo”. Seguramente va a ser un diálogo interesante entre ambos», concluye Lecuit. IyC

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 589, págs. 186-188, 2021.
Traducido y adaptado con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

A fluid-to-solid jamming transition underlies vertebrate body axis elongation. Alessandro Mongera, et al. en *Nature*, vol. 561, n.º 7723, págs. 401-405, septiembre de 2018.
Hydraulic fracturing and active coarsening position the lumen of the mouse blastocyst. Julen G. Dumortier, et al. en *Science*, vol. 365, págs. 465-468, agosto de 2019.
Mechanisms of stretch-mediated skin expansion at single-cell resolution. M. Aragona, et al. en *Nature*, vol. 584, n.º 7820, págs. 268-273, julio de 2020.
Periodic oscillations of Myosin-II mechanically proofread cell-cell connections to ensure robust formation of the cardiac vessel. S. Zhang, et al. en *Current Biology*, vol. 30, nº 17, págs. 3364-3377.e4, septiembre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fuerzas mecánicas en las células. Stefano Piccolo en *IyC*, diciembre de 2014.
Mecanobiología de los tejidos celulares. Pilar Rodríguez Franco, Xavier Trepat y Raimon Sunyer en *IyC*, junio de 2018.

GRAVEDAD CUÁNTICA

La física cuántica reescribe la causalidad

Varios experimentos recientes han mostrado que es posible mezclar el orden de las causas y sus efectos. El fenómeno ha abierto una nueva vía para explorar el comportamiento cuántico de la gravedad

Natalie Wolchover



LAS LEYES CUÁNTICAS pueden hacer que la relación causal entre dos sucesos no esté bien definida. Una nueva línea de investigación intenta reformular la física fundamental prescindiendo del concepto de causalidad.

Natalie Wolchover escribe sobre física fundamental y cosmología en *Quanta Magazine*.



Alicia y Benito, los protagonistas de tantos experimentos mentales, están preparando la cena cuando sufren un percance: a Alicia se le cae un plato y el ruido sobresalta a Benito, quien se quema en el fogón y grita. En otra versión de los hechos, Benito se quema y grita, y es eso lo que hace que a Alicia se le caiga el plato.

A lo largo de la última década, los físicos han examinado las implicaciones de una extraña constatación: en mecánica cuántica, las dos versiones de una historia así pueden ocurrir en principio a la vez. Es decir, dos eventos pueden suceder en un orden causal indefinido en el que las afirmaciones «*A* causa *B*» y «*B* causa *A*» son ciertas al mismo tiempo. «Suena extravagante», admite Časlav Brukner, físico de la Universidad de Viena.

Esta posibilidad se desprende del fenómeno cuántico de la superposición, según el cual las partículas mantienen simultáneamente todas las realidades posibles hasta el momento en que las medimos. En laboratorios de Austria, China, Australia y otros países, los físicos pueden observar ese orden causal indefinido al llevar un fotón a una superposición de dos estados. Entonces, someten una rama de la superposición al proceso *A* seguido del proceso *B*, y la otra al proceso *B* seguido del *A*. En este procedimiento, conocido como «conmutador cuántico» (*quantum switch*) el resultado de *A* influye en lo que ocurre en *B*, y viceversa: el fotón experimenta ambos órdenes causales a la vez.

En los últimos cinco años, una creciente comunidad de físicos ha implementado el conmutador cuántico en el laboratorio y ha analizado las ventajas que ofrece el orden causal indefinido en computación y comunicación cuánticas. «Realmente es algo que podría ser útil en nuestro día a día», afirma Giulia Rubino, investigadora de la Universidad de Bristol que en 2017 lideró la primera demostración experimental del conmutador cuántico.

Pero la posible utilidad práctica del fenómeno no hace sino acentuar sus profundas implicaciones. Los físicos intuyen desde hace tiempo que la imagen habitual en que los sucesos se desarrollan como una secuencia de causas y efectos no capta la naturaleza fundamental de las cosas. Y sostienen que, si queremos desentrañar el origen cuántico de la gravedad, del espacio y del tiempo, es probable que debamos abandonar esa perspectiva causal. Hasta hace poco, sin embargo, no disponían de demasiadas ideas sobre cómo podría funcionar esta «física poscausal». «Muchos creen que la causalidad es tan básica para nuestra comprensión del mundo que, si diluyésemos esa noción, no seríamos capaces de formular teorías coherentes y con significado», señala Brukner, uno de los referentes en el estudio de la causalidad indefinida.

Eso está cambiando con los recientes experimentos sobre conmutadores cuánticos, así como con varios experimentos mentales en los que Alicia y Benito se enfrentan a la indefinición causal creada por la naturaleza cuántica de la gravedad. Para explicar esas situaciones, los investigadores se han visto obligados a desarrollar formalismos matemáticos alternativos y nuevas maneras de pensar. Con esos marcos conceptuales, asegura Brukner «podemos hacer predicciones sin necesidad de tener una causalidad bien definida».

CORRELACIÓN, NO CAUSALIDAD

Aunque los avances se han precipitado en fechas recientes, numerosos expertos consideran que esta estrategia para abordar el problema de la gravedad cuántica emana de un trabajo publicado en 2005 por Lucien Hardy, investigador del Instituto Perimeter de Física Teórica de Waterloo. «En mi caso», corrobora Brukner, «todo empezó con el artículo de Hardy».

Por aquel entonces, Hardy era conocido por haber aplicado a la mecánica cuántica un enfoque conceptual popularizado en su día por Albert Einstein. Cuando el físico alemán revolucionó la física, no lo hizo reflexionando sobre lo que existe en el mundo,

EN SÍNTESIS

En los últimos años, varios trabajos han revelado que la causalidad no es un concepto necesariamente bien definido en mecánica cuántica: es posible superponer dos secuencias donde los eventos se suceden con un orden causal invertido.

Una noción relacionada aparece también en relatividad general, la teoría de la gravedad formulada en 1915 por Albert Einstein: las relaciones causales entre dos puntos del espaciotiempo dependen de la geometría de este, la cual es dinámica.

Los físicos están intentando conjugar ambos fenómenos para formular una teoría de gravedad cuántica que prescinda del concepto de causalidad. Al mismo tiempo, algunas de estas ideas ya han encontrado aplicaciones en información cuántica.

PÁGINAS ANTERIORES: CODY MUIR/*QUANTA MAGAZINE*

sino sobre lo que podemos medir. En concreto, lo hizo imaginando personas que efectuaban mediciones con reglas y relojes desde trenes en movimiento. Gracias a este enfoque «operacional», fue capaz de concluir que el espacio y el tiempo debían ser relativos. En 2001, Hardy aplicó ese mismo planteamiento a la mecánica cuántica y reconstruyó la teoría a partir de cinco axiomas operacionales. Después, se propuso continuar con un rompecabezas aún mayor y con más de ochenta años de historia: cómo conciliar la mecánica cuántica y la relatividad general, la sensacional teoría de la gravedad de Einstein. «Me motiva la idea de que ese modo operacional de pensar en la teoría cuántica pueda aplicarse a la gravedad cuántica», comenta Hardy.

La pregunta operacional es: ¿qué podemos observar, en principio, en gravedad cuántica? Hardy meditó sobre el hecho de que tanto la mecánica cuántica como la relatividad general poseen una característica radical propia. Es bien sabido que la mecánica cuántica es indeterminista, ya que la superposición permite la existencia de posibilidades simultáneas. La relatividad general, por su parte, indica que el espacio y el tiempo son maleables. En la teoría de Einstein, los cuerpos como la Tierra «estiran» la métrica del espaciotiempo; es decir, la distancia entre las marcas de una regla y la duración entre los tics de un reloj. Cuanto más cerca estemos de un objeto de gran masa, por ejemplo, más lento será el tictac de nuestro reloj. Y a su vez, la métrica determina el «cono de luz» de un suceso cercano; esto es, la región del espaciotiempo sobre la que ese evento puede ejercer una influencia causal. Si combinamos estas dos características radicales, expone Hardy, tendremos que las dos posibilidades cuánticas simultáneas estiran la métrica de maneras distintas. El cono de luz de un suceso se vuelve por tanto indefinido y, en consecuencia, también lo hace la propia causalidad.

La mayoría de los trabajos sobre gravedad cuántica omiten una de esas características. Algunos investigadores intentan describir el comportamiento de los gravitones (los cuantos de la gravedad), pero solo consideran un trasfondo temporal fijo. «Estamos muy acostumbrados a pensar en un mundo que evoluciona con el tiempo», apunta Hardy. Sin embargo, razona, la gravedad cuántica seguramente heredará la característica radical de la relatividad general y carecerá de un tiempo y de una causalidad fijos. «Así que, en realidad, la idea es lanzarse a la piscina», asevera este tranquilo y serio físico, «y aceptar esa situación descabellada donde no existe una estructura causal definida».

Durante la conversación que mantuvimos por Zoom, Hardy empleó un proyector especial para mostrar una pizarra en la que esbozó varios experimentos mentales, empezando por uno que le ayudó a entender cómo describir los datos sin hacer ninguna referencia al orden causal de los sucesos. Hardy imaginó un conjunto de naves espaciales que toman datos mientras viajan por el universo. Pongamos por caso que estudian la luz polarizada procedente de una supernova. Cada segundo, cada nave registra su ubicación, la orientación de su polarizador (un dispositivo que, como las gafas polarizadas, bloquea o deja pasar un fotón en función de su polarización) y si un sensor situado tras el polarizador detecta o no un fotón. Después, cada sonda transmite esos datos a una persona que se encuentra en una sala y que los imprime en una tarjeta. Pasado un tiempo, concluye esa tanda del experimento. La persona de la sala baraja todas las tarjetas de todas las sondas y las dispone en un montón.

En un espaciotiempo maleable, la superposición cuántica implica que el cono de luz de un suceso se vuelve indefinido y, en consecuencia, también lo hace la propia causalidad

A continuación, las sondas giran sus polarizadores y llevan a cabo una nueva serie de mediciones, lo que genera otro montón de tarjetas. Este proceso se repite una y otra vez, hasta que la persona de la sala acaba con un gran número de montones de tarjetas con mediciones desordenadas. «Su misión consiste en sacar algo en claro de esas tarjetas», explica Hardy. La persona pretende formular una teoría que dé cuenta de todas las correlaciones estadísticas presentes en los datos —y que, al hacerlo, describa la supernova— sin ninguna información sobre las relaciones causales o su ordenación temporal, ya que estas podrían no ser aspectos fundamentales de la realidad.

¿Cómo lograrlo? En primer lugar, nuestro amigo de la sala podría disponer las tarjetas según la ubicación, repartiendo las de cada montón de manera que las que correspondan a sondas situadas en una determinada región del espacio acaben en la misma pila. Al hacer eso con todos los montones, quizá empiece a descubrir correlaciones entre las pilas. Podría darse cuenta de que, cada vez que se detecta un fotón en una región, hay muchas probabilidades de que se produzca una detección en otra si la orientación de los polarizadores coincide en ambos lugares. Dicha correlación implicaría que la luz que atraviesa esas zonas tiende a presentar una polarización común. Entonces, podría combinar las probabilidades y obtener expresiones aplicables a regiones de mayor tamaño, con lo que iría construyendo «objetos matemáticos para zonas cada vez mayores a partir de otras más pequeñas», señala Hardy.

En el formalismo de Hardy, lo que solemos considerar relaciones causales (como cuando los fotones viajan de una región a otra del cielo y eso hace que las mediciones efectuadas en la primera estén correlacionadas con las que más tarde ser harán en la segunda) se traduce en una compresión de datos: la cantidad de información necesaria para describir todo el sistema se reduce, ya que un conjunto de probabilidades determina el otro.

Hardy bautizó ese nuevo marco conceptual como «formalismo del causaloide», donde el *causaloide* es el objeto matemático que sirve para calcular las probabilidades asociadas a los resultados de cualquier medición en cualquier región. Presentó la teoría en su artículo de 2005: un denso trabajo de 68 páginas donde mostraba cómo usarla para formular la teoría cuántica (básicamente, aplicando sus expresiones probabilísticas generales al caso concreto de bits cuánticos en interacción). Hardy pensaba que también debería ser posible formular la relatividad general a partir del causaloide, pero no tenía claro cómo. Si lo conseguía, escribió en otro artículo en 2007, «se podría emplear ese formalismo para construir una teoría de gravedad cuántica».

CONMUTADOR CUÁNTICO

Unos años más tarde, en Pavía, el experto en información cuántica Giulio Chiribella y tres de sus colaboradores meditaban sobre

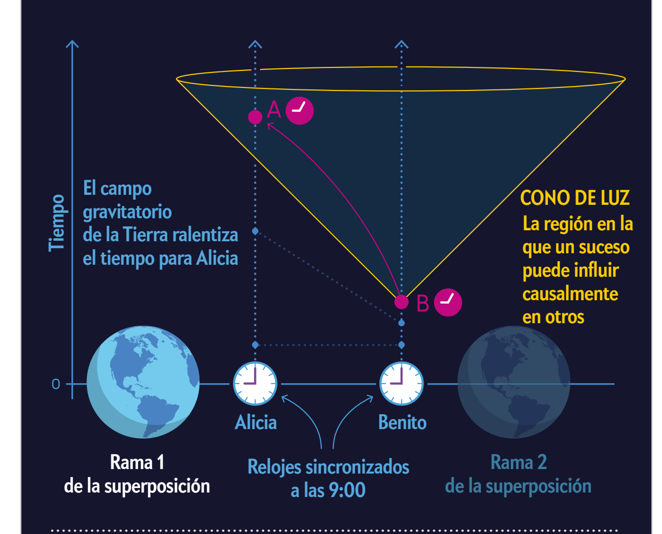
EXPERIMENTO MENTAL

Superposición de causa y efecto

Supongamos que la Tierra se encuentra en una superposición cuántica de dos posiciones distintas. En una rama de la superposición, el planeta está más cerca de la nave espacial de Alicia, lo que causa que su reloj vaya más lento que el de Benito. En la otra rama ocurre lo contrario, por lo que es el reloj de Benito el que funciona más despacio. Esta situación permite que Alicia y Benito puedan influir causalmente uno sobre el otro al mismo tiempo.

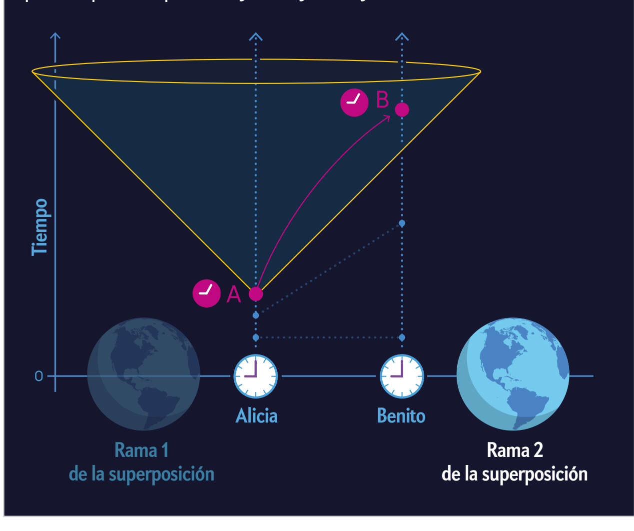
Rama 1: La Tierra está más cerca de Alicia

Alicia y Benito sincronizan sus relojes a las 9:00. A las 9:05, según sus respectivos relojes, Alicia causa el evento A y Benito el evento B. Dado que para Alicia el tiempo ha transcurrido más despacio, el evento B puede afectarla antes de que suceda A.



Rama 2: La Tierra está más cerca de Benito

En esta rama de la superposición cuántica, la masa de la Tierra hace que sea el reloj de Benito el que vaya más lento. En tal caso, el evento A puede ejercer una influencia causal sobre el evento B. Así pues, las leyes cuánticas parecen permitir que A influya en B y B influya en A de manera simultánea.



SAMUEL VELASCO/*QUANTA MAGAZINE*

otra cuestión: ¿qué tipos de cálculos son posibles? Tenían en mente el trabajo canónico del teórico de la computación Alonzo Church, quien en los años treinta del pasado siglo desarrolló un conjunto de reglas formales para construir funciones; es decir, «máquinas matemáticas» que aceptan una entrada y generan una salida. Un aspecto sorprendente de las reglas de Church es que la entrada de una función puede ser otra función.

Los cuatro físicos se preguntaron lo siguiente: ¿qué tipos de funciones de funciones son posibles en general, más allá de la capacidad de cálculo que tengan los ordenadores actuales? Idearon un procedimiento en el que dos funciones, *A* y *B*, se combinaban para dar una nueva. Esta última, a la que llamaron conmutador cuántico, era una superposición de ambas opciones. En una rama de la superposición, la entrada de la función pasa primero por *A* y luego por *B*; en la otra, lo hace primero por *B* y luego por *A*. Esperaban que su conmutador cuántico pudiera constituir la base de un nuevo modelo de computación inspirado en el de Church, rememora Chiribella.

Al principio, la revolución no acababa de arrancar. Los físicos no lograban dilucidar si el conmutador cuántico era algo profundo o trivial, ni si era factible o tan solo hipotético. Su artículo tardó cuatro años en publicarse. Cuando por fin salió a la luz, en 2013, los investigadores ya empezaban a vislumbrar la manera de construir conmutadores cuánticos.

Por ejemplo, podían enviar un fotón a un divisor de haz. Allí, según las leyes cuánticas, la partícula tiene una probabilidad del 50 por ciento de transmitirse y otro tanto de reflejarse, por lo que hace ambas cosas. La versión transmitida del fotón se dirige a un dispositivo óptico que rota la polarización de la luz de una manera bien definida. Después, el fotón se topa con otro instrumento similar que gira la polarización de una forma distinta. Llamemos a esos dispositivos *A* y *B*, respectivamente. Entretanto, la versión reflejada del fotón se encuentra primero con *B* y luego con *A*. En este caso, su polarización experimenta un cambio diferente.

Podemos pensar en esas dos posibilidades (*A* antes que *B*, o *B* antes que *A*) en términos de un orden causal indefinido. En la primera rama, *A* ejerce una influencia causal sobre *B*, en el sentido de que la entrada y la salida de *B* serían totalmente distintas si *A* no hubiera ocurrido. Del mismo modo, en la segunda rama, *B* ejerce una influencia causal sobre *A*, ya que el último proceso no podría haberse dado sin *B*. Una vez que se han producido esos eventos causales alternativos, otro divisor de haz reúne las dos versiones del fotón. Al medir su polarización (y la de muchos otros fotones) obtenemos una distribución estadística de resultados.

Brukner y dos de sus colaboradores diseñaron métodos cuantitativos para comprobar si esos fotones realmente experimentaban o no un orden causal indefinido. En 2012, los investigadores calcularon un límite máximo para la correlación estadística que puede existir entre los resultados de la polarización y las rotaciones realizadas en *A* y *B* cuando estas se producen en un orden causal fijo. Si, al efectuar el experimento en el laboratorio, se observa un valor que supera ese umbral (es decir, que viola dicha «desigualdad causal»), eso significa que las influencias causales tienen lugar en ambas direcciones y que no es posible asignarles un orden causal definido.

«La idea de la desigualdad causal fue muy buena e hizo que mucha gente empezara a trabajar en este campo», relata Rubino, que hizo lo propio en 2015. En su trabajo de 2017, ella y sus colaboradores lograron un hito al concebir la primera demostración experimental del conmutador cuántico que funcionaba

más o menos como la que acabamos de exponer. Gracias a un tipo de test más sencillo ideado por Brukner y su grupo un par de años antes, en 2015, los investigadores lograron confirmar que, en efecto, el orden causal de su experimento era indefinido.

La atención pasó entonces a centrarse en cómo aprovechar esa indefinición. Chiribella y sus colaboradores argumentaron que sería posible transmitir mucha más información a través de canales ruidosos si el envío se efectuaba en un orden indefinido. Desde entonces, Kaumudibikash Goswami, de la Universidad de Queensland, y sus colaboradores han verificado experimentalmente esa ventaja comunicativa. En 2019, un equipo liderado por Jian-Wei Pan, de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China en Hefei, llevó a cabo el que Rubino considera «el experimento más bello» hasta la fecha: los investigadores demostraron que dos personas podían comparar largas cadenas de bits de forma exponencialmente más eficiente cuando esa información se transmitía en ambas direcciones y no en un orden causal fijo; una ventaja que ya habían anticipado Brukner y su colaboradores en 2016. Y, en enero de este año, Huan Cao y otros investigadores de Hefei anunciaron que un motor (que en general necesita un foco caliente y otro frío para funcionar) podía extraer calor de dos focos a la misma temperatura gracias al conmutador cuántico: un uso sorprendente que había sido propuesto unos meses antes por David Felce y Vlatko Vedral, teóricos de la Universidad de Oxford.

PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA CUÁNTICO

Sin embargo, no resulta nada evidente cómo usar todos estos trabajos experimentales y extenderlos para investigar la gravedad cuántica. Todos los artículos sobre el conmutador cuántico apuntan a un vínculo entre la gravedad cuántica y la causalidad indefinida. Pero las superposiciones de objetos con una masa apreciable (es decir, que puedan deformar la métrica del espaciotiempo de varias maneras a la vez) se desvanecen tan deprisa que nadie ha concebido aún un método para detectar la consiguiente vaguedad en las relaciones causales. Así las cosas, los físicos han decidido abordar el problema por medio de experimentos mentales.

Volvamos a Alicia y Benito. Imaginemos que se hallan en sendos laboratorios espaciales próximos a la Tierra, la cual se encuentra en una superposición cuántica de dos posiciones (algo extraño, pero no imposible). En realidad, no es necesario que el planeta entero se halle en un estado de superposición para que la gravedad genere una indefinición causal; un solo átomo en superposición de dos posiciones también definiría la métrica de dos maneras distintas. Pero, si nos interesa lo que —en principio— podríamos medir, resulta más conveniente pensar a lo grande.

En una rama de la superposición, la Tierra está más cerca de la nave de Alicia, por lo que su reloj avanza más despacio que el de Benito. En la otra, el planeta se encuentra más próximo a Benito, por lo que en ella es su reloj el que va más lento. Cuando Alicia y Benito se comunican, el orden causal se ve alterado. En un artículo clave publicado 2019, Magdalena Zych, Brukner y sus colaboradores demostraron que esa situación permitiría que Alicia y Benito alcanzaran un orden causal indefinido.

En primer lugar, un fotón se topa con un divisor de haz y se separa en dos posibles caminos, dirigiéndose tanto al laboratorio de Alicia como al de Benito. Todo está dispuesto de modo que, en la rama de la superposición en la que el reloj de Alicia va más lento, el fotón llega primero al laboratorio de Benito. Este rota la polarización del fotón y se lo envía a Alicia, quien lleva a cabo su propia rotación y le manda el fotón a Carlos, otro físico que se encuentra en un tercer laboratorio lejano. En la otra rama de la superposición, el fotón le llega primero a Alicia, y de ella pasa a Benito y a Carlos. Al igual que en el ejemplo del conmutador cuántico, este «conmutador cuántico gravitatorio» crea una superposición de «*A* y luego *B*» y «*B* y luego *A*». Por último, Carlos vuelve a juntar las dos trayectorias del fotón y mide su polarización. Alicia, Benito y Carlos llevan a cabo el experimento una y otra vez, y descubren que la correlación estadística entre sus rotaciones y los resultados de las medidas es tan fuerte que las rotaciones tienen que haber ocurrido en un orden causal indefinido.

Para analizar la indefinición causal en situaciones como esta, en 2018 el grupo de Brukner desarrolló un método para codificar la probabilidad de observar resultados diferentes en lugares distintos sin hacer referencia a un fondo temporal fijo, igual que en el esquema del causaloide de Hardy. Su técnica, que bautizaron como «formalismo de las matrices de proceso», sirve para manejar probabilidades que no afectan causalmente en las demás, que influyen en una sola dirección o que lo hacen en ambas a la vez. «Es perfectamente posible definir las condiciones en que podemos preservar esas probabilidades sin necesidad de suponer si van antes o después», incide Brukner.

Aún no está clara la relación entre el enfoque operacional de la gravedad cuántica y otras propuestas, como la teoría de cuerdas y la gravedad cuántica de bucles

Mientras tanto, en 2016, Hardy había logrado su objetivo de reformular la relatividad general a partir del causaloide. En esencia, halló una forma más elaborada de ordenar sus montones de tarjetas. Demostró que era posible representar cualquier medición en un espacio abstracto desprovisto de suposiciones causales. Por ejemplo, podríamos inspeccionar una pequeña región del universo y medir diversos parámetros: la densidad de oxígeno, la cantidad de energía oscura, etcétera. Después, podemos plasmar esos datos en un único punto de un espacio abstracto multidimensional que posea un eje distinto para cada cantidad medible, y luego repetir la operación con tantas regiones del espaciotiempo como deseemos.

Tras haber representado el contenido del espaciotiempo en ese espacio auxiliar, comienzan a aparecer patrones y superficies. La gráfica conserva todas las correlaciones que existían en el espaciotiempo, pero ahora sin ningún marco temporal y sin ninguna noción de causa y efecto. Y el formalismo del causaloide permite obtener expresiones para la probabilidad relativas a regiones de la gráfica cada vez mayores. La idea es que este método común para la mecánica cuántica y la relatividad general permita encontrar un lenguaje apropiado con el que describir la gravedad cuántica. Ahora, Hardy intenta figurarse cuáles deberían ser los próximos pasos.

Hace poco, tanto él como el grupo teórico de Viena han identificado un concepto que podría servir de puente hacia la futura física poscausal: un «principio de equivalencia cuántico», análogo al principio de equivalencia que, hace un siglo, guio a Einstein hacia la relatividad general. Una forma de enunciar este último es que, si bien el espaciotiempo puede estar muy estirado y curvado, localmente (por ejemplo, en el interior de un ascensor en caída libre) siempre parecerá plano y clásico, lo que permite aplicar la física newtoniana. «El principio de equivalencia permitía encontrar la vieja física dentro de la nueva», comenta Hardy. «Eso fue suficiente para Einstein.»

El principio de equivalencia cuántico funciona del siguiente modo. La gravedad cuántica permite que la métrica del espaciotiempo se curve de varias maneras a la vez, lo que implica que cualquier suceso posee varios conos de luz diferentes y, por tanto, que la causalidad es indefinida. Pero Hardy apunta que, si examinamos distintas métricas del espaciotiempo, podemos hallar una forma de identificar puntos que, al menos localmente, haga que los conos de luz coincidan. Y al igual que el espaciotiempo parece newtoniano en el interior del ascensor de Einstein, esa identificación define un sistema de referencia donde la causalidad parece estar definida. «Los puntos que estaban en el futuro de un cono de luz están también en el futuro de los demás, así que a nivel local su estructura causal coincide.» El principio de equivalencia cuántica de Hardy postula que siempre existe esa identificación. «Es una manera de lidiar con la extravagancia de la estructura causal indefinida», asegura.

Einstein formuló su principio de equivalencia en 1907, pero no acabó de desarrollar la relatividad general hasta 1915. Hardy espera recorrer un camino similar en su búsqueda, aunque admite que no es «tan inteligente como Einstein, ni tampoco tan joven».

LOS LADRILLOS DEL ESPACIOTIEMPO

Brukner y Flaminia Giacomini han explorado ideas similares sobre sistemas de referencia cuánticos y principios de equivalencia. Aún no está clara la relación entre el enfoque operacional de la gravedad cuántica que propugnan estos investigadores y otras propuestas, como la teoría de cuerdas y la gravedad cuántica de bucles, las cuales buscan cuantizar la gravedad a partir de unidades discretas (ya sean cuerdas o bucles diminutos, según el caso). Brukner subraya que estas teorías «no poseen implicaciones operacionales inmediatas». Al igual que Hardy, prefiere «tratar de aclarar los conceptos pertinentes y conectarlos con cosas que, en principio, podamos observar». Pero, en última instancia, la gravedad cuántica debería ser específica y responder no solo a la pregunta de qué podemos observar, sino también a la pregunta de qué existe y qué no. En otras palabras, ¿cuáles son los componentes cuánticos básicos de la gravedad, del espacio y del tiempo?

Según Zych, los estudios sobre la estructura causal indefinida contribuyen a la búsqueda de una teoría completa de gravedad cuántica de dos maneras: proporcionan un formalismo matemático y guían la elaboración de teorías concretas, ya que el razonamiento debería ser válido en cualquier enfoque que escojamos para cuantizar la gravedad. «Estamos desarrollando una intuición sobre los fenómenos asociados a los aspectos cuánticos del orden temporal y causal, y eso nos ayudará a entender estas cuestiones en el marco de una teoría completa de la gravedad cuántica», sostiene la investigadora.

En la actualidad, Hardy participa en una gran colaboración denominada Estructura de la Información Cuántica del Espaciotiempo (QISS, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es promover el intercambio de ideas entre comunidades de investigadores como él, versados en fundamentos cuánticos y en información cuántica, y otras comunidades que trabajan en gravedad cuántica. Carlo Rovelli, conocido experto en gravedad cuántica de bucles de la Universidad de Aix-Marsella y líder de QISS, se refirió a Hardy como «un pensador certero» que aborda los problemas «desde una perspectiva distinta y con un lenguaje diferente» que Rovelli encuentra útiles.

Hardy cree que su formalismo del causaloide podría ser compatible con la gravedad cuántica de bucles o con la teoría de cuerdas, al tiempo que podría ayudar a formular dichas teorías de manera que no asuman que los objetos evolucionan sobre un fondo temporal fijo. «Estamos tratando de descubrir distintas rutas para escalar la montaña», señala. Y sospecha que el camino más fiable hacia la gravedad cuántica será el que gira en torno a la idea de una estructura causal indefinida.

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

Probability theories with dynamic causal structure: A new framework for quantum gravity. Lucien Hardy en **arxiv.org/abs/gr-qc/0509120**, septiembre de 2005.
Quantum computations without definite causal structure. Giulio Chiribella et al. en *Physical Review A*, vol. 88, art. 022318, agosto de 2013.
Quantum correlations with no causal order. Ognyan Oreshkov, Fabio Costa y Časlav Brukner en *Nature Communications*, vol. 3, art. 1092, octubre de 2012.
Experimental verification of an indefinite causal order. Giulia Rubino et al. en *Science Advances*, vol. 3, art. e1602589, marzo de 2017.
Bell's theorem for temporal order. Magdalena Zych et al. en *Nature Communications*, vol. 10, art. 3772, agosto de 2019.
Implementation of the quantum equivalence principle. Lucien Hardy en *Progress and Visions in Quantum Theory in View of Gravity*, dirigido por Felix Finster et al. Birkhäuser-Cham, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El universo cuántico autoorganizado. Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz y Renate Loll en *IyC*, septiembre de 2008.
Teorías supracuánticas. Miguel Navascués en *IyC*, septiembre de 2016.
La gravedad cuántica, camino de convertirse en ciencia. Sabine Hossenfelder en *IyC*, enero de 2017.
Enredados en el espaciotiempo. Clara Moskowitz en *IyC*, marzo de 2017.



ECONOMÍAS ALTERNATIVAS PARA UN MUNDO SOSTENIBLE



Para reconciliarnos con la biosfera será necesario crear comunidades y relaciones centradas en la sostenibilidad de la vida, tanto humana como no humana.

Texto y fotografías de Ashish Kothari

LAS SEMILLAS AUTÓCTONAS alimentadas con agua de lluvia y suplementos orgánicos permiten que Nadimidoddi Vinodamma, de la Sociedad para el Desarrollo del Decán (una cooperativa agrícola del sur de la India), cultive suficientes alimentos para su familia y para venderlos en los mercados locales.



Ashish Kothari es miembro fundador de Kalpavriksh, una organización ecologista de la India. Ayuda a coordinar el Tejido Global de Alternativas y es coautor o coeditor de diversos libros, como *Churning the Earth* (Penguin, 2012) y *Pluriverso* (Icaria, 2019).



l pasado marzo, Moligeri Chandramma me aseguraba mediante un intérprete que en su aldea nadie había sufrido escasez de alimentos durante los confinamientos y que tampoco se vieron afectados por la COVID-19. Esta agricultora de las tierras áridas del sur de la India cultiva más de 40 especies y variedades de plantas (sobre todo lentejas, especias, mijo y arroz autóctonos) en una parcela de poco más de una hectárea. Chandramma forma parte de la Sociedad para el Desarrollo del Decán (DDS, por sus siglas en inglés), una cooperativa compuesta por casi 5000 mujeres dalit (intocables) y adivasi (indígenas). Su extraordinaria manera de compaginar la conservación de la biodiversidad con la obtención de sustento agrícola les valió en 2019 el prestigioso premio Ecuatorial de las Naciones Unidas. Tras padecer malnutrición extrema y discriminación social y de género en la década de 1980, estas agricultoras disfrutan ahora de soberanía alimentaria y seguridad económica. Y no solo están logrando capear la pandemia, sino que en 2020 cada familia de la DDS ayudó con unos 10 kilogramos de cereales a los habitantes de la región que carecían de tierras y sustento.



1

Al otro lado del mundo, seis comunidades quechuas de los Andes peruanos gestionan el Parque de la Papa en Pisac, Cuzco, un paisaje montañoso que es uno de los lugares de origen de la patata. Protegen esa región como un «patrimonio biocultural», un tesoro biológico y cultural heredado de sus antepasados, y conservan más de 1300 variedades de patata. Cuando visité la zona en 2008 junto a otros investigadores y activistas, la diversidad me dejó sin palabras.

«Este es el resultado de veinte años de trabajo constante para lograr que nuestro sistema alimentario vuelva a ser local, tras una época en la que dependíamos en exceso de agencias externas para cubrir nuestras necesidades básicas», declaró el agricultor Mariano Sutta Apocusi en agosto de 2020 a Local Futures, una organización dedicada a reforzar comunidades de todo el mundo. «Centrarnos en lo local nos ha ayudado a mejorar el acceso y la asequibilidad de una gran variedad de alimentos, sobre todo patatas nativas, quinua, quihuicha, otros tubérculos andinos y maíz, que cultivamos empleando métodos agroecológicos indígenas.» Las comunidades instauraron fuertes medidas sanitarias y de seguridad cuando sobrevino la pandemia, al tiempo que recogían una cosecha abundante y distribuían más de una tonelada de patatas a los inmigrantes, a

EN SÍNTESIS

La pandemia ha expuesto la fragilidad de una economía globalizada que se anuncia como beneficiosa para todos, pero que en realidad genera injusticia social y destrucción ecológica.

Para crear un mundo sostenible y equitativo habrá que introducir cambios en cinco ámbitos interconectados: el económico, el político, el social, el cultural y el ecológico.

En todo el planeta están surgiendo alternativas muy diversas, pero basadas en principios (gobernanza local, autosuficiencia, solidaridad) y valores similares, como el respeto y responsabilidad hacia toda forma de vida.



2

MOLIGERI CHANDRAMMA gestiona el banco de semillas (*1*) de la Sociedad para el Desarrollo del Decán, que contiene más de 70 especies y variedades de cultivos. Concentración (*2*) en 2005 para conmemorar los veinte años de protestas contra la construcción de presas en el río Narmada.

los ancianos y a un centro de acogida para madres adolescentes maltratadas de la ciudad de Cuzco.

En Europa, muchas iniciativas de «economía solidaria», que fomentan una cultura de la empatía y la compartición de recursos, se pusieron manos a la obra cuando los confinamientos relacionados con la COVID-19 provocaron la pérdida de numerosos puestos de trabajo. En Lisboa, los centros sociales Disgraça y RDA69, que tratan de recuperar la vida comunitaria en un entorno urbano muy fragmentado, ofrecieron alimentos gratis o económicos a quien los necesitara. Y no solo proporcionaban comidas, sino también espacios donde los refugiados, sintecho, jóvenes desempleados y demás personas que de otra forma habrían quedado desatendidas podían interactuar y establecer vínculos con familias en mejor situación económica, lo que creó una especie de red de seguridad social. Los organizadores confiaban en que aquellos con los medios suficientes donaran alimentos o fondos a la iniciativa, reforzando así el sentimiento de comunidad en los vecindarios circundantes.

La pandemia ha expuesto la fragilidad de una economía globalizada que se anuncia como beneficiosa para todos, pero que en realidad crea profundas desigualdades e inseguridad. En 2020, solo en la India, 75 millones de habitantes se hallaban por debajo del umbral de pobreza; en el mundo, cientos de millones de personas cuya supervivencia y sustento dependen del comercio e intercambio de bienes y servicios a larga distancia se vieron gravemente afectadas. Durante la crisis financiera de 2008 se produjeron desajustes similares, si bien no tan extremos, cuando la especulación con productos básicos y el desvío de granos para producir biocombustibles hizo que se disparara el precio de los cereales a nivel mundial. Eso produjo hambre y disturbios en muchos países que dependían de los alimentos importados. La supervivencia también se ve amenazada cuando la guerra u otras perturbaciones impiden la circulación de mercancías. En tales crisis, a las comunidades les va mejor si disponen de mercados y servicios locales, y pueden obtener sus propios alimentos, energía y agua a la vez que cuidan de los menos afortunados.

Sin embargo, el valor de estos estilos de vida alternativos va más allá de su resiliencia durante trastornos relativamente breves, como puede ser una pandemia. Como investigador y activista ambiental que reside en un país «en vías de desarrollo», siempre he defendido que la visión del mundo de los pueblos que viven cerca de la naturaleza debe incorporarse a las estrategias globales de protección de la vida silvestre, como ocurre en la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y el Convenio de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica. Y en las últimas décadas he llegado a coincidir con críticos de la globalización como el sociólogo y ecologista Wolfgang Sachs en que, para evitar desgracias como el colapso de la biodiversidad, no harán falta solo adaptaciones ambientales, sino también cambios radicales en los paradigmas económico, social e incluso político.

En 2014, algunos de nosotros iniciamos en la India un proceso para explorar vías hacia un mundo donde la gente estuviera en paz con los demás y con la naturaleza. Cinco años después (casualmente, justo antes de que estallara la pandemia), el proyecto se transformó en una red internacional en línea que denominamos Tejido Global de Alternativas. Esas conversaciones y otros estudios indican que las opciones viables, sin importar donde se desarrollen, suelen basarse en la autosuficiencia y la solidaridad.

Esos valores están reñidos con la globalización, que entrega a los habitantes del norte global (los ricos, vivamos donde vivamos) muchas cosas que hemos llegado a considerar esenciales. Nuestra civilización se basa en la promesa de una riqueza material cada vez mayor. En cambio, los pueblos que viven cerca o más allá de los márgenes de esa civilización poseen una plétora de visiones sobre lo que significa vivir bien, adaptadas a las particularidades de sus ecosistemas y culturas. Para alejarnos del precipicio que supone la desestabilización irreversible de la biosfera, debemos permitir que estructuras alternativas como las de las agricultoras dalit, los conservadores quechuas y los voluntarios de Lisboa prosperen y se entrelacen en un tejido que acabe por cubrir todo el planeta.

UN VIAJE INSPIRADOR

El hecho de crecer en la India, donde hay estilos de vida íntimamente conectados con el entorno natural que sobreviven en áreas extensas, sin duda influyó en mis ideas sobre qué es la verdadera sostenibilidad. En los años setenta yo era un estudiante de secundaria que adoraba observar pájaros en los bosques cercanos a Delhi. Cuando algunos príncipes árabes llegaron al país para cazar avutardas indias (ahora en grave peligro de extinción), me uní a mis compañeros de clase para manifestarnos en el exterior de la embajada de Arabia Saudí. Nuestra protesta, junto a la de la comunidad bishnoi de Rajastán, que tradicionalmente ha protegido a estas aves y a otras especies salvajes, avergonzó al Gobierno indio hasta tal punto que acabó pidiendo a los cazadores que se fueran. Muchos de nosotros pasamos a

pedir que se protegiese el bosque de la cresta de Delhi, una de las mayores selvas urbanas del mundo. En 1979 creamos un grupo ecologista para coordinar nuestros esfuerzos y lo llamamos Kalpavriksh, en honor a un árbol mítico que hace que se cumplan los deseos; el nombre simbolizaba nuestra creciente conciencia de que la naturaleza nos lo da todo.

Nuestro activismo nos iba a enseñar tanto o más que el instituto y la universidad. Mientras investigábamos el origen de la contaminación de Delhi, por ejemplo, entrevistamos a los campesinos que vivían en torno a una central eléctrica de carbón situada en las afueras de la ciudad. Resultó que les afectaba mucho más el polvo y la contaminación que a los habitantes de la urbe, aunque no recibían nada de esa electricidad. Los beneficios del proyecto iban a parar principalmente a quienes ya disfrutaban de mejores condiciones, mientras que los más desfavorecidos sufrían la mayoría de los daños.


1

A finales de los años ochenta, viajamos al Himalaya occidental para conocer a las protagonistas del icónico movimiento Chipko. Esas campesinas llevaban desde 1973 protegiendo con sus cuerpos los árboles que pretendían talar el Departamento Forestal o las empresas radicadas en las llanuras indias. Los cedros del Himalaya, robles, rododendros y otras especies que estaban derribando eran sagrados para esas mujeres, así como esenciales para su supervivencia: les aportaban forraje, abono y alimentos silvestres, y sustentaban sus fuentes de agua. Aun siendo un estudiante de ciudad, me daba cuenta del papel esencial que desempeñaban las campesinas en la protección ambiental, y también de lo injusto que era que los burócratas tomaran decisiones desde la distancia sin preocuparse de sus repercusiones sobre la población local.

Poco después, mis amigos y yo nos enteramos de que se iban a construir 30 grandes presas en la cuenca del río Narmada, en el centro de la India. Millones de personas veneraban ese río como una diosa tempestuosa pero magnánima, tan inmaculada que creen que cada año limpia sus pecados cuando la visita Ganga (el Ganges). Al recorrer su cauce de 1300 kilómetros a pie, en barca y en autobús, nos deslumbraron las cascadas que se precipitaban en espectaculares gargantas, las frondosas laderas repletas de vida salvaje, los campos con mil y un cultivos, las prósperas aldeas y los templos antiguos, todo lo cual quedaría sumergido bajo el agua. Empezamos a cuestionarnos el propio concepto de desarrollo. ¿No sería la destrucción muy superior a cualquier posible beneficio? Por desgracia, casi cuatro décadas después, nuestros miedos se han hecho realidad. Cientos de miles de personas desplazadas aún esperan una compensación adecuada, y las presas han convertido el curso inferior del río en apenas un hilo, lo que ha permitido que el agua del mar se introduzca 100 kilómetros tierra adentro.

Con el paso de los años, comprendí que hay poderosas fuerzas económicas que se extienden por el planeta y vinculan de forma estrecha la injusticia social con la destrucción ecológica. La era de la colonización y la esclavitud amplió enormemente el alcance económico y militar de algunos Estados nación y sus aliados corporativos. Y eso facilitó la extracción de recursos naturales y la explotación de la mano de obra en todo el mundo para alimentar la incipiente revolución industrial de Europa y Norteamérica. Los historiadores de la economía, los antropólogos y otros expertos han demostrado que esta desgarradora historia sentó las bases de la economía global de hoy en día. Además de provocar daños ecológicos irreversibles, este sistema económico priva a muchas comunidades de su acceso a los bienes comunes (ríos, prados y bosques esenciales para su supervivencia), al tiempo que crea una dependencia de los mercados externos. El enorme sufrimiento causado por la pandemia solo ha dejado al descubierto estas grietas históricas y contemporáneas.

Durante mis décadas de viajes, y en especial mientras investigaba para un libro que escribí con el economista Aseem Shrivastava, descubrí una tendencia mucho más optimista. A lo largo del país y en todo el mundo, cientos de movimientos sociales están empoderando a los marginados para que recuperen el control de sus vidas y medios de subsistencia. En 2014, Kalpavrisksh puso en marcha una serie de reuniones llamadas Vikalp Sangam, o Confluencia de Alternativas, donde los impulsores de estos entusiastas esfuerzos podían compartir ideas y experiencias, y colaborar, contribuyendo así a alcanzar una masa crítica que posibilitara el cambio.

Esas interacciones y mis lecturas eclécticas me permitieron comprender mejor una cuestión vital que estaba investigando: ¿cuáles son las características esenciales de las alternativas deseables y viables? Por suerte, no estaba solo en esta búsqueda. En una conferencia sobre decrecimiento celebrada en Leipzig en 2014, tenía muchas ganas de escuchar a Alberto Acosta, un economista y antiguo político de Ecuador, hablar del «buen vivir», una visión indígena del mundo basada en coexistir en armonía con los demás y con el resto de la naturaleza. Aunque Acosta no hablaba inglés ni yo español, intentamos conversar con entusiasmo; en un momento dado, el experto en decrecimiento Federico Demaria se unió e hizo las veces de traductor. Decidimos trabajar en una recopilación de alternativas prósperas de todo el mundo, y anotamos 20 posibles ideas en el reverso de un sobre. Más adelante, reclutamos al crítico del desarrollo Arturo Escobar y a la ecofeminista Ariel Salleh como coeditores de un volumen que llamamos *Pluriverso*. El número de entradas se amplió hasta superar la centena.

PUNTOS EN COMÚN

Las alternativas que surgen en todo el mundo son asombrosamente diversas, pero comparten ciertos principios básicos. El más importante es mantener o recuperar la gobernanza comunitaria de los bienes comunes: la tierra, los ecosistemas, las semi-





EL PARQUE DE LA PAPA (*1*), en Perú, es uno de los lugares de origen de la patata. El pueblo indígena quechua (*2*) lo gestiona como un territorio de «patrimonio biocultural» y conserva una gran variedad de patatas (*3*).

llas, el agua y el conocimiento. En la Inglaterra del siglo xii, los poderosos empezaron a vallar campos, prados, bosques y arroyos que hasta entonces habían sido utilizados por todos. Esos «cercamientos» de los terratenientes e industriales se extendieron por toda Europa y se aceleraron con la Revolución Industrial, lo que forzó a decenas de millones de personas desposeídas a trabajar en las fábricas o emigrar al Nuevo Mundo, y devastó las poblaciones nativas. Las naciones imperiales se apoderaron de gran parte de los continentes y reconfiguraron las economías de las colonias, extrayendo materias primas para las fábricas, captando mercados para la exportación de productos manufacturados y obteniendo alimentos como trigo, azúcar y té para la recién creada clase trabajadora. De este modo, los colonizadores y sus aliados establecieron un sistema de dominación económica perpetua que dio lugar al norte global y el sur global (el mundo de los marginados, vivan donde vivan).

La ola de movimientos anticoloniales, muchos de ellos exitosos, que se produjo en las primeras décadas del siglo xx hizo temer por los suministros de materias primas para las industrias y por los mercados para los productos acabados de mayor valor. El presidente de EE.UU. Harry S. Truman respondió lanzando un programa para aliviar la pobreza en las «zonas subdesarrolladas» con economías «primitivas y estancadas». Como detalló el ecologista Debal Deb, las instituciones financieras recién creadas y controladas por los países ricos ayudaron a las antiguas colonias a «desarrollarse» siguiendo la senda trazada por Occidente, proporcionando materiales, fuentes de energía y nuevos mercados para los coches, las neveras y otros bienes de consumo. Un aspecto esencial del desarrollo, tal y como se concibe, propaga y generalmente impone a través de las estrictas condiciones asociadas a los préstamos del Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional, ha sido la privatización o expropiación de bienes comunes para extraer metales, petróleo y agua.

Sin embargo, como demostró Elinor Ostrom, ganadora del premio Nobel de economía en 2009, los bienes comunes son mucho más sostenibles cuando los gestionan las comunidades locales que cuando lo hacen los Gobiernos o corporaciones que se los arrebatan. Esta constatación ha dado lugar a innumerables esfuerzos populares para proteger los bienes comunes restantes y restablecer el control sobre otros. También se ha ampliado la definición de bienes comunes para incluir los «recursos físicos y de conocimiento que compartimos todos en beneficio de todos», explica la socióloga Ana Margarida Esteves, quien participa en la Asamblea Europea de Bienes Comunes, una organización que coordina cientos de esas iniciativas.

Muchos de esos proyectos se parecen al de la DDS y el Parque de la Papa en la utilización de la gobernanza comunitaria de los recursos comunes para potenciar la agroecología (agricultura minifundista que preserva el suelo, el agua y la biodiversidad) y la soberanía alimentaria (el control sobre todos los medios de producción de alimentos, lo que incluye la tierra, el suelo, las semillas y los conocimientos sobre cómo usarlos). La Vía Campesina, un movimiento por la soberanía alimentaria fundado en Brasil en 1993, aglutina hoy en día a unos 200 millones de agricultores de 81 países. Esos intentos por lograr la autosuficiencia y la gobernanza comunitaria también se extienden a otras necesidades básicas, como la energía y el agua. En Costa Rica, España e Italia, algunas cooperativas rurales llevan generando electricidad de manera local y controlando su distribución desde los años noventa. Y cientos de pueblos del oeste de la India han avanzado hacia la «democracia del agua», basada en la captación descentralizada de agua y en la gestión comunitaria de los humedales y las aguas subterráneas. Movilizar a la gente para sustentar, construir o reconstruir sistemas locales de conocimiento es un factor clave de esos esfuerzos.

Garantizar el derecho a administrar los bienes comunes también es importante. En la Amazonia ecuatoriana, los indí-

Esferas de transformación

Para crear un mundo sostenible y equitativo habrá que modificar cinco ámbitos interconectados: el económico, el político, el social, el cultural y el ecológico. Podemos verlos como pétalos de una flor, en cuyo centro se hallan los valores: solidaridad, dignidad, interrelación, derechos y responsabilidades, diversidad, autonomía, libertad, autodeterminación, autosuficiencia, simplicidad, no violencia y respeto por todas las formas de vida. Las comunidades indígenas han vivido durante siglos de acuerdo con valores similares, y los habitantes de las sociedades industriales también los están adoptando y reivindicando como solución a las crisis globales de carácter ecológico y social.

FUENTE: «ALTERNATIVES TRANSFORMATION FORMAT: A PROCESS FOR SELF-ASSESSMENT AND FACILITATION TOWARDS RADICAL CHANGE», PREPARADO POR KALPAVRIKSH PARA ACKNOWL-EJ; FEDERICA FRAGAPANE *(gráfico)*

genas záparas lucharon con denuedo para obtener derechos colectivos sobre su hogar, la pluviselva. Ahora lo defienden frente a los intereses petrolíferos y mineros, a la vez que desarrollan un modelo de bienestar económico que combina sus cosmovisiones tradicionales (formas de conocer, ser y hacer que establecen vínculos físicos y espirituales con su entorno) con nuevas actividades como el ecoturismo gestionado por la comunidad. Los ingresos procedentes del turismo han caído en picado durante la pandemia, pero sus bosques y ética comunitaria les proporcionan casi todo lo que necesitan en cuanto a comida, agua, energía, viviendas, medicinas, entretenimiento, salud y aprendizaje. Ahora ofrecen sesiones en línea sobre su concepción del mundo, análisis de los sueños y métodos curativos. Participé en ellas en persona en 2019, en su campamento de ecoturismo de Naku. Aunque la versión virtual no es tan inmersiva, no deja de ser una adaptación innovadora a las circunstancias actuales.

Para lograr que las ciudades sean más verdes o acogedoras, como persiguen los centros sociales lisboetas, también es necesario que la gobernanza recaiga en la comunidad y que la economía se base en la empatía y la compartición. En todo el sur global, los proyectos de desarrollo han llevado a cientos de millones de personas a las ciudades, donde viven en suburbios y trabajan en condiciones precarias. Los ciudadanos ricos pueden contribuir consumiendo menos, lo que reduciría la extracción de recursos y el vertido de residuos que desplazan a la gente a lugares lejanos. Ha surgido todo un abanico de vías hacia ciudades más equitativas y sostenibles, como el Movimiento de Transición, que intenta regenerar los bienes comunes y hacer que las ciudades europeas alcancen las cero emisiones netas de carbono; o el movimiento municipalista, que está creando una red de Ciudades sin Miedo, entre ellas Barcelona, Valparaíso, Madrid y Atenas, a fin de ofrecer entornos seguros para los refugiados y migrantes. La agricultura urbana de La Habana cubre más de la mitad de sus necesidades de alimentos frescos y ha inspirado muchas iniciativas similares en todo el mundo.

CINCO PÉTALOS

Esos proyectos ponen de manifiesto la necesidad de realizar transformaciones fundamentales en cinco ámbitos interconectados. En la esfera económica, debemos alejarnos del paradigma del desarrollo, incluida la idea de que el crecimiento económico

dado por el producto interior bruto es la mejor forma de lograr nuestros objetivos. En cambio, precisamos sistemas que respeten los límites ecológicos, enfaticen el bienestar en todas sus dimensiones y establezcan intercambios locales que favorezcan la autosuficiencia, así como buenas medidas de estos indicadores. Bután lleva tiempo experimentando con la felicidad nacional bruta como índice, y la idea ha engendrado variantes: por ejemplo, Nueva Zelanda se está centrando en la salud mental y otras medidas de progreso parecidas.

También necesitamos liberarnos del control monetario y financiero centralizado. Hay en marcha muchos experimentos sobre monedas alternativas y economías basadas en la confianza y los intercambios locales. Puede que los más innovadores sean los «bancos de tiempo», un sistema de permuta de servicios que gira en torno a la idea de que todas las habilidades u ocupaciones merecen el mismo respeto. Uno puede, por ejemplo, dirigir una sesión de yoga de una hora a cambio de un crédito que luego puede canjear por una hora de trabajo en la reparación de una bicicleta.

En muchas partes del mundo, los trabajadores están tratando de controlar los medios de producción: la tierra, la naturaleza, el conocimiento y las herramientas. Hace unos años visité Vio.Me, una fábrica de detergentes en Tesalónica. Los trabajadores habían tomado el control y pasado de una producción con productos sintéticos a otra respetuosa con el medio, basada en el aceite de oliva. Además, habían establecido una igualdad salarial absoluta, sin importar la función que desempeñase el trabajador. En la pared, un eslogan proclamaba «¡No tenemos jefe!».

De hecho, se está redefiniendo el propio concepto de trabajo. La modernidad globalizada ha creado un abismo entre el trabajo y el ocio, y esa es la razón por la que esperamos desesperadamente que llegue el fin de semana. Hay muchos movimientos que tratan de reducir esa brecha para aumentar nuestro placer, creatividad y satisfacción. En los países industriales, se están recuperando formas manuales de confeccionar ropa, calzado o alimentos procesados, con lemas como «¡El futuro se hace a mano!». En el oeste de la India, muchos jóvenes están abandonando trabajos frustrantes en las fábricas para volver a tejer en telares manuales, lo que les permite controlar su tiempo y les proporciona una salida creativa.

En la esfera política, la centralización del poder inherente a los Estados nación, ya sean democráticos o autoritarios, desempodera a muchos pueblos. La nación zápara en Ecuador y los adivasi del centro de la India abogan por una democracia más directa donde el poder resida principalmente en la comunidad. El Estado (mientras siga existiendo) ayudaría sobre todo en la coordinación a gran escala y debería responder de la toma de decisiones sobre el terreno. La antigua noción india de *swaraj*, cuya traducción literal es «autogobierno», resulta especialmente relevante, pues hace hincapié en la autonomía individual y colectiva y en la libertad, que conllevan una responsabilidad hacia la autonomía y la libertad de los otros. Una comunidad que practica el *swaraj*, por ejemplo, no puede represar un arroyo si eso pone en peligro el suministro de agua de los pueblos situados aguas abajo: su bienestar no puede comprometer el de los demás.

Esa idea de democracia también cuestiona las fronteras de los Estados nación, muchas de las cuales son producto de una historia colonial y dividen zonas ecológica y culturalmente contiguas. Así, el pueblo kurdo se reparte entre Turquía, Irán, Iraq y Siria. Hace tres décadas que luchan por ser autónomos y establecer una democracia directa basada en los principios de sostenibilidad ecológica y liberación de la mujer, sin fronteras que los separen. Y los grupos indígenas de México que se identifican colectivamente como zapatistas llevan más de treinta años reclamando y controlando una región autónoma sobre la base de principios similares.

Avanzar hacia esa democracia radical perfilaría un mundo con muchas menos fronteras, donde decenas de miles de comunidades relativamente autónomas y autosuficientes se entrelazarían en un tejido de alternativas. Esas sociedades se conectarían entre sí mediante redes «horizontales» de intercambio equitati-


1


2

LOS TRABAJADORES como Dimitris Koumatsioulis (*1*) dirigen conjuntamente Vio.Me, una fábrica ecológica de detergentes en Tesalónica. En Praga, la gente compra y vende en un mercado local (*2*) de agricultores y productores.



KUZGUNCUK BOSTAN, un huerto urbano en Estambul, permite a los ciudadanos cultivar de forma colectiva sus propias frutas y verduras, y otros productos.

vo y respetuoso, y también mediante instituciones «verticales», pero con una responsabilidad descendente (las superiores deben rendir cuentas a las inferiores), para gestionar los procesos y actividades en todo el territorio.

Hay en marcha diversos experimentos sobre el biorregionalismo a gran escala, aunque la mayoría siguen manteniendo una gobernanza relativamente vertical. En Australia, la Iniciativa de la Gran Cordillera Oriental busca coordinar la conservación de los ecosistemas a lo largo de 3600 kilómetros, preservando los medios de vida y la salud comunitaria. Un proyecto en los Andes que abarca seis países tiene como objetivo conservar como Patrimonio de la Humanidad el Qhapaq Ñan, una red de caminos de 30.000 kilómetros construida por el Imperio inca, junto a su legado cultural, histórico y ambiental.

Por supuesto, el autogobierno local puede ser opresivo o excluyente. Los tradicionales consejos de muchas aldeas indias, profundamente patriarcales y basados en castas, y las posturas xenófobas y en contra de los refugiados de la derecha en Europa constituyen un ejemplo. Por lo tanto, una tercera esfera crucial de la transformación es la justicia social, que engloba las luchas contra el racismo, el sistema de castas, el patriarcado y otras formas tradicionales o modernas de discriminación y explotación. Por suerte, el éxito al desafiar al sistema económico dominante a menudo comporta victorias contra la discriminación, como cuando las agricultoras dalit se sacudieron siglos de opresión patriarcal y de casta para alcanzar la soberanía alimentaria.

La autonomía política y la independencia económica no tienen por qué traducirse en aislacionismo o xenofobia. Por contra, la globalización actual (que, contra toda lógica, permite la libre circulación de bienes y fondos, pero detiene a personas desesperadas en las fronteras) se vería reemplazada por intercambios culturales y materiales que preserven la autosuficiencia local y respeten la sostenibilidad ecológica. En este tipo de «localización» también tendrían cabida las personas necesitadas: los refugiados del cambio climático o de la guerra serían bienvenidos, como ocurre en la red global de Ciudades sin Miedo. Tanto las prácticas razonables como los cambios en las políticas podrían ayudar a transitar hacia un sistema de ese tipo. Por supuesto, hay que intentar reconstruir las sociedades en las regiones en conflicto para que las personas no tengan que huir de ellas.

Para que se produzca un cambio radical también son necesarias transformaciones en una cuarta esfera: la de la cultura y el conocimiento. La globalización devalúa los idiomas, las culturas y los sistemas de conocimiento que no se adaptan al desarrollo. Existen diversos movimientos que se enfrentan a esta tendencia homogeneizadora. Por ejemplo, para resucitar su lengua casi extinta y conservar su conocimiento del bosque, la nación zápara los ha incluido en el programa de estudios de la escuela local. Muchas comunidades tratan de «descolonizar» los mapas, recuperando su toponimia y cuestionando las fronteras políticas. Incluso la proyección de Mercator, surgida durante la época colonial y utilizada para generar el mapamundi al que estamos acostumbrados, se está abandonando. (Hasta hace poco no me percaté de que África es tan grande como para que quepan en ella Europa, China, EE.UU. y la India juntos.) Las ciencias tradicionales y modernas colaboran cada vez más para resolver los problemas más espinosos de la humanidad. La *Evaluación de la biodiversidad del Ártico*, por ejemplo, representa una cooperación entre las comunidades indígenas y los científicos universitarios para afrontar el cambio climático.

Una dificultad es que las instituciones educativas actuales forman estudiantes equipados para servir al sistema económi-

co dominante y perpetuarlo. Sin embargo, la comunidad y la naturaleza están regresando a los espacios de enseñanza en las «escuelas bosque» de muchas partes de Europa, que proporcionan a los niños un aprendizaje práctico en plena naturaleza; en las escuelas autónomas zapatistas, que instruyen sobre diversas culturas y luchas; o en la Alianza Ecoversidades, formada por centros de enseñanza superior de todo el mundo que permiten a los académicos perseguir un conocimiento que trascienda las fronteras habituales entre disciplinas académicas.

No obstante, la esfera de transformación más importante es la ecológica: reconocer que somos parte de la naturaleza y que el resto de especies son dignas de respeto por derecho propio. A lo largo del sur global, las comunidades están llevando a cabo iniciativas para restaurar los ecosistemas degradados y la vida silvestre a fin de conservar la biodiversidad. Así, los indígenas u otras comunidades locales gestionan decenas de miles de «territorios de vida». Entre ellos están las zonas marinas administradas localmente en el Pacífico Sur, los territorios indígenas de Latinoamérica y Australia, los bosques comunitarios del sur de Asia y las tierras ancestrales en Filipinas. También cabe mencionar las leyes o sentencias judiciales recientes de diversos países que garantizan, por ejemplo, que los ríos disfrutan de la misma protección que las personas. En 2009, la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó una resolución titulada *Armonía con la naturaleza* que representa un paso fundamental hacia la consecución de este objetivo.

VALORES

A menudo me preguntan cómo implantar las alternativas exitosas a gran escala. Sin embargo, creo que sería contraproducente intentar ampliar o reproducir una DDS o un Parque de la Papa. La esencia de este enfoque es la diversidad: el reconocimiento de que cada caso es distinto. Lo que puede hacer la gente es comprender los valores subyacentes y aplicarlos en sus propias comunidades, mientras establecen vínculos con proyectos similares para extender el impacto. Así es, de hecho, como se propagan las iniciativas exitosas.

El proceso de Vikalp Sangam ha servido para identificar los siguientes valores fundamentales: solidaridad, dignidad, interconectividad, derechos y responsabilidades, diversidad, autonomía y libertad, autosuficiencia y autodeterminación, simplicidad, no violencia y respeto hacia toda forma de vida. A lo largo y ancho del planeta, las concepciones del mundo centradas en la vida, ya sean antiguas o modernas, se basan en principios similares. Los pueblos indígenas y otras comunidades locales se han mantenido fieles durante siglos a visiones del mundo como el buen vivir, *swaraj*, *ubuntu* (una filosofía africana según la cual el bienestar de todos los seres vivos está interconectado) y muchos otros sistemas éticos similares, y los están reafirmando. Al mismo tiempo, en las sociedades industriales han surgido planteamientos como el decrecimiento y el ecofeminismo, que constituyen el germen de potentes contraculturas.

Esas concepciones del mundo giran en torno a un principio sencillo: todos poseemos poder y, al ejercerlo, no solo reivindicamos nuestra autonomía y libertad, sino que también somos responsables de garantizar la autonomía de los demás. Ese *swaraj* se fusiona con la sostenibilidad ecológica para crear un eco-*swaraj* que incluye el respeto por toda forma de vida.

Es evidente que esas transformaciones fundamentales se enfrentan a un *statu quo* muy arraigado que responde de manera violenta cuando percibe una amenaza: cientos de defensores ambientales mueren asesinados cada año. Otro reto importante es que muchas personas del norte global desconocen que existe otro modo de vivir bien distinto al sueño americano. Aun así, el hecho de que estén prosperando muchas iniciativas progresistas y estén brotando otras nuevas hace pensar que la combinación de resistencia y alternativas constructivas tiene una oportunidad.

La pandemia de COVID-19 es una catástrofe que sitúa a la humanidad frente a una elección. ¿Retomaremos algo parecido a la antigua normalidad o adoptaremos nuevas vías para escapar de la crisis global ecológica y social? Para aumentar las probabilidades de que ocurra lo segundo, hay que ir mucho más allá de los planteamientos del *Green New Deal* de Estados Unidos, Europa y otros países. Su gran atención a la crisis climática y los derechos de los trabajadores es valiosa, pero también debemos cuestionar los patrones de consumo insostenibles, las desigualdades flagrantes y la necesidad de que existan Estados nación centralizados.

Una recuperación verdaderamente sostenible debe hacer hincapié en todas las esferas del eco-*swaraj*, al que se llegará por cuatro vías. Una es la creación o recuperación de medios de vida dignos, seguros y autosuficientes para dos mil millones de personas, basados en la gobernanza colectiva de los recursos naturales y en procesos de producción a pequeña escala como la agricultura, la pesca, la artesanía, la industria y los servicios. Otra es un programa para la restauración y conservación de los ecosistemas, gestionado por los pueblos indígenas y las comunidades locales. La tercera es una inversión pública inmediata en salud, educación, transporte, vivienda, energía y otras necesidades básicas, planeada y ejecutada por la gobernanza democrática local. Por último, es esencial ofrecer incentivos y desestímulos que conduzcan a patrones de producción y consumo sostenibles. Estos planteamientos integrarían la sostenibilidad, la igualdad y la diversidad, dando voz a todo el mundo y, en especial, a los más marginados. Hay muchas propuestas de esta naturaleza, como un proyecto que busca crear un millón de empleos relacionados con el clima en Sudáfrica, un plan de recuperación feminista para Hawái o diversas iniciativas que buscan la justicia social en otros países.

Nada de esto será fácil, pero creo que es crucial si queremos reconciliarnos con la Tierra y con nosotros mismos.

PARA SABER MÁS

Recognising and supporting territories and areas conserved by indigenous peoples and local communities: Global overview and national case studies. Dirigido por Ashish Kothari et al. Secretariado del Convenio de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica, 2012.

Pluriverso: Un diccionario del posdesarrollo. Dirigido por Ashish Kothari et al. Icaria, 2019.

The case for degrowth. Giorgos Kallis, Susan Paulson, Giacomo D'Alisa y Federico Demaria. Polity, 2020

Cities of dignity: Urban transformations around the world. Dirigido por Mabrouka M'Barek et al. Grupo de trabajo global Beyond Development, 2020.

Página web del proyecto Tejido Global de Alternativas: **https://globaltapestryofalternatives.org/**

EN NUESTRO ARCHIVO

El coste ambiental de la desigualdad. James K. Boyce en *IyC*, enero de 2019.

Colombia: del conflicto a la economía verde. Rachel Nuwer en *IyC*, enero de 2020.

Las limitaciones del PIB. Joseph E. Stiglitz en *IyC*, octubre de 2020.

Al rescate del arroz. Debal Deb en *IyC*, enero de 2021.

por Marta Forés Maresma

La mosca de la fruta en la investigación del cáncer

Ciertos tejidos de la larva revelan los detalles de procesos celulares similares al cáncer de mama

La mosca de la fruta o del vinagre (*Drosophila melanogaster*) viene utilizándose en las investigaciones genéticas desde hace más de cien años. El ciclo de vida corto, el pequeño tamaño y el bajo coste de mantenimiento en el laboratorio hacen de este pequeño animal un modelo excepcional para el estudio de enfermedades.

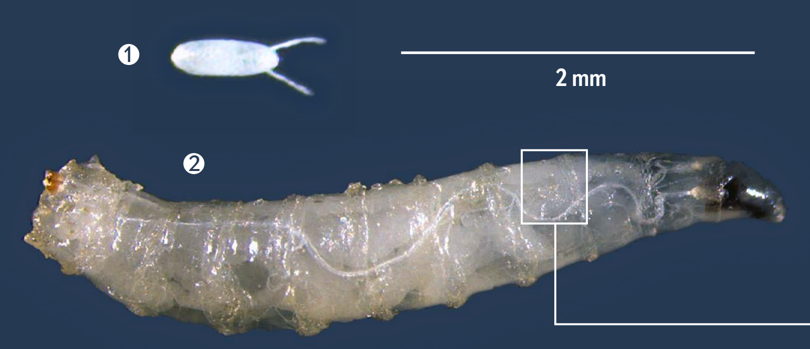
La larva de la mosca alberga unas estructuras particularmente interesantes: los discos imaginales. Se trata de unas formaciones celulares con aspecto de saco que darán lugar a las distintas partes del adulto (alas, antenas, ojos, patas, etc.). Los discos se generan a partir de grupos de entre 10 y 50 células que, en apenas cuatro días, se multiplican hasta alcanzar unas 50.000 células. El rápido crecimiento y el tipo de estructura de los discos, con una disposición celular muy similar a la de los tejidos humanos, los convierten en modelos idóneos para estudiar enfermedades proliferativas como el cáncer.

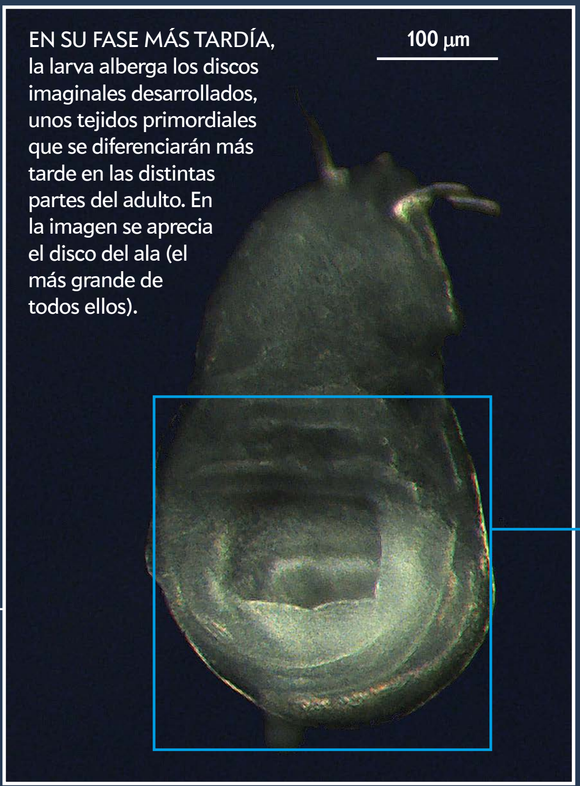
Una de las líneas de investigación de nuestro laboratorio utiliza la mosca de la fruta para explorar un fenómeno llamado competición celular. Durante este proceso, las células potencialmente cancerosas, a las que denominamos «ganadoras», crecen y colonizan los tejidos a expensas de eliminar las células vecinas normales, o «perdedoras». Entender qué características definen a ambos tipos de células y cómo se comunican entre sí resulta clave para poder frenar el avance de poblaciones potencialmente cancerosas.

Con ese objetivo, hemos desarrollado un sensor de contacto entre las células ganadoras y las perdedoras. Mediante la modificación de algunos genes de la mosca, generamos grupos de células ganadoras en el disco imaginal del ala. Estas contienen mutaciones que promueven la formación de distintos tipos de cáncer, entre ellos el de mama. Con nuestro sensor de contacto, logramos que las células ganadoras brillen en verde bajo un microscopio de fluorescencia, mientras que las perdedoras brillan en rojo. De este modo, es posible identificar las células que compiten entre sí, trazar su posición y estudiar las interacciones mutuas. Gracias a este sensor, además, podemos introducir mutaciones adicionales en ambos tipos de células para observar si frenan la expansión de las potencialmente cancerosas. Los resultados de esta investigación pueden resultar de utilidad en la búsqueda de nuevos tratamientos contra el cáncer.

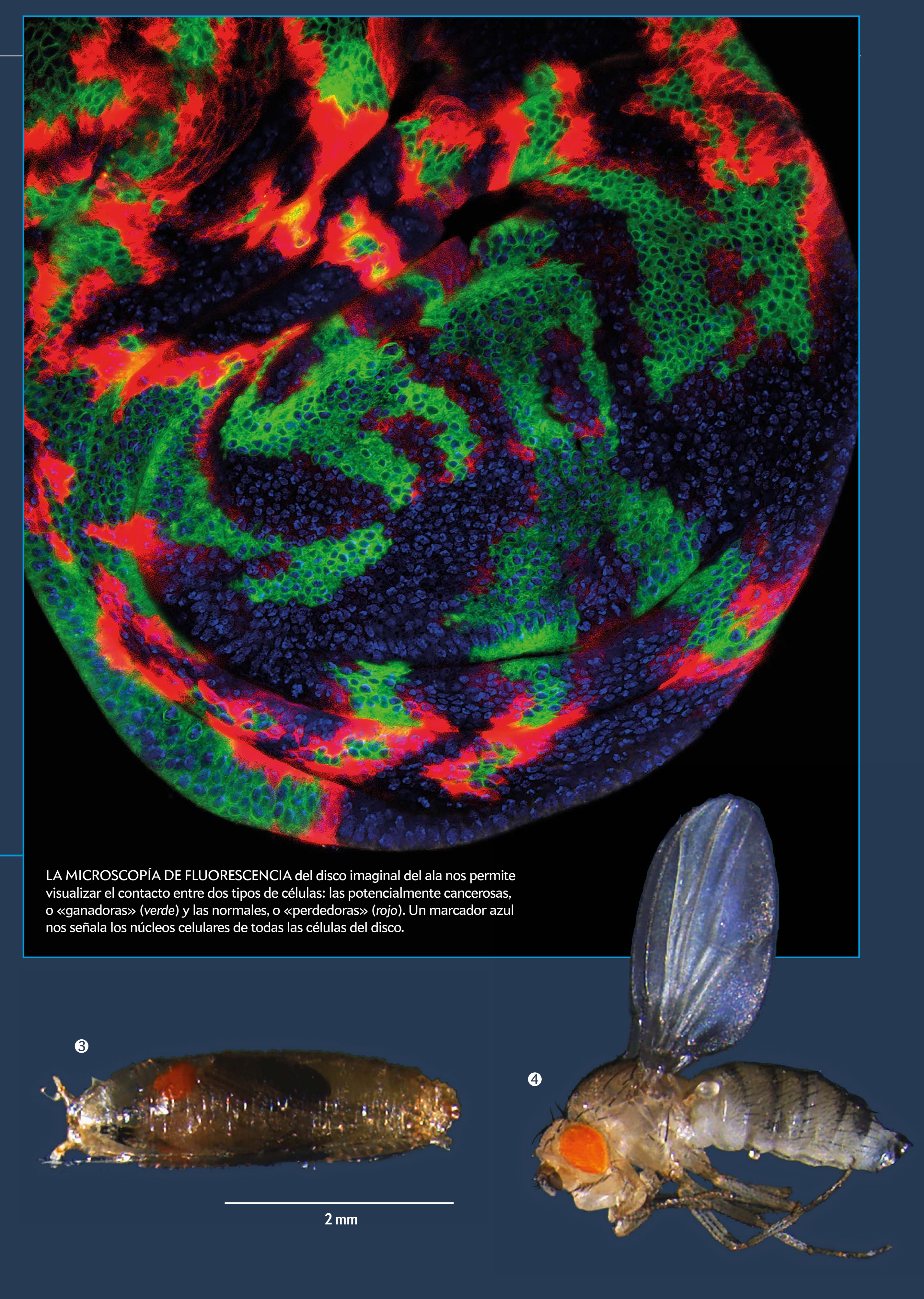
—Marta Forés Maresma es investigadora de la unidad de cáncer de mama (BCN) del Laboratorio de Muerte Celular e Inmunidad, en el Instituto de Investigación del cáncer (ICR), en Londres.

LA MOSCA DE LA FRUTA se desarrolla en cuatro fases: ❶ huevo, ❷ larva, ❸ pupa y ❹ adulto. En el laboratorio, el ciclo se completa en diez días.





EN SU FASE MÁS TARDÍA, la larva alberga los discos imaginales desarrollados, unos tejidos primordiales que se diferenciarán más tarde en las distintas partes del adulto. En la imagen se aprecia el disco del ala (el más grande de todos ellos).



LA MICROSCOPÍA DE FLUORESCENCIA del disco imaginal del ala nos permite visualizar el contacto entre dos tipos de células: las potencialmente cancerosas, o «ganadoras» (*verde*) y las normales, o «perdedoras» (*rojo*). Un marcador azul nos señala los núcleos celulares de todas las células del disco.

por Ximo Guillem Llobat

Ximo Guillem Llobat es profesor de historia de la ciencia en la Universidad de Valencia e investigador del Instituto Interuniversitario López Piñero.



La construcción científica de la ignorancia

El caso de la invisibilización del riesgo asociado a los plaguicidas tóxicos

En octubre de 1907, el director de la Estación de Patología Vegetal de Moncloa, Leandro Navarro Pérez, recibía el encargo de estudiar la «enfermedad existente en los olivos del pueblo de Mora, de la provincia de Toledo». Así se establecía en un Real Decreto del 25 de aquel mes, con el que se iniciaban intensos trabajos de estudio y divulgación de los métodos para combatir la plaga de *Liothrips oleae*, o arañuelo del olivo.

Después de meses de estudios *in situ*, Navarro publicó una primera memoria en la que se indicaban los métodos químicos y mecánicos que podían frenar el fuerte impacto que estaba teniendo aquel tisanóptero en el olivar local. Los resultados se presentaron a través de hojas informativas, conferencias y proyecciones visuales cuidadosamente preparadas tanto para la divulgación como para la formación de técnicos. Navarro se involucró también en un buen número de reuniones con las autoridades locales. Toda esta actividad tuvo importantes consecuencias en las prácticas agrícolas de aquella región. La buena valoración que se hizo de su trabajo se evidenció de formas diversas, tanto entre los ingenieros agrónomos como por parte de las autoridades locales de Mora de Toledo, que acabaron por dedicar una calle y una lápida a la memoria del ilustre ingeniero.

Navarro siguió estudiando la plaga del arañuelo del olivo. En 1912 puso a punto un nuevo método para controlarla. Consistía en la aplicación de fumigaciones con ácido cianhídrico, una sustancia extremadamente tóxica que ya estaba utilizándose para combatir algunas plagas que afectaban a los cítricos del País Valenciano. En aquel momento se sabía que una corta exposición al cianhídrico podía resultar letal (posiblemente por ello fue utilizado habitualmente en suicidios). Su toxicidad parecía exigir medidas especiales para evitar riesgos innecesarios en su uso agrícola. Pero, ¿cómo se comunicó el riesgo y las medidas de seguridad que debían tomarse en su aplicación al control de la plaga del arañuelo del olivo?

Para responder a esta pregunta primero debemos tener en cuenta el procedimiento a través del cual se aplicaba el cianhídrico en el control de plagas del campo. El método consistía en cubrir el árbol con una lona blanca y generar en el interior el ácido cianhídrico. Para ello se mezclaban ácido sulfúrico, agua y cianuro sódico o potásico, que reaccionaban de manera inmediata y generaban el cianhídrico. El operario que se situaba bajo la lona debía salir inmediatamente después de añadir el último reactivo, evitando, en la medida de lo posible, respirar antes de haber salido.

Con el tiempo se generaron manuales e impartieron cursos para formar a los capataces que debían dirigir los trabajos de fumigación. En ambos casos se insistió siempre en las medidas que debían tomarse para evitar riesgos innecesarios: usar guantes para manipular el cianuro potásico o sódico, limpiarse las manos después de fumigar y antes de fumar o comer, evitar días de viento en los que este podría levantar las lonas y dejar escapar el cianhídrico, quedando así expuestos los operarios, etcétera. En el contexto español, estas medidas se difundieron en los materiales y cursos que se promovieron fundamentalmente desde la Estación de Patología Vegetal de Burjassot, pero también a través de documentos generados por el mismo Navarro. En 1912, este autor publicaba una memoria sobre nuevas aplicaciones de la fumigación cianhídrica en la cual se incluían todas estas medidas de seguridad.

NAVARRO Y UN OPERARIO muestran la eficacia plaguicida del ácido cianhídrico, que causa la muerte instantánea en los animales.

FUENTE: «FUMIGACIÓN DE LOS OLIVOS POR MEDIO DEL GAS CIANHÍDRICO», LEANDRO NAVARRO, 1914. FILMOTECA ESPAÑOLA

El olivar constituía ya un cultivo prioritario en España y estaba en clara expansión: de mediados del siglo XIX a finales del primer tercio del siglo XX pasó a ocupar más de un millón de nuevas hectáreas. Y la influencia de los productores se dejó notar en episodios como aquel que llevó a principios del siglo XX a legislar que el aceite de oliva sería el único aceite considerado comestible en el contexto español. Resulta, por tanto, comprensible que las innovaciones introducidas por Navarro en la fumigación cianhídrica para hacer frente a una importante plaga de este cultivo, como el uso de lonas oscuras para poder fumigar en horario diurno y el establecimiento de dosis hasta siete veces menores a las necesarias en los cítricos, generaran grandes esperanzas.

Con el objetivo de satisfacer esas expectativas, Navarro no solo se dedicó in-

tensamente a la puesta a punto del método de aplicación, sino también a la difusión del mismo. Lo hizo de formas diversas. Pero una especialmente interesante fue la que le llevó a producir el documental *Fumigación de los olivos por medio del gas cianhídrico*.

Este filme, que constituye uno de los primeros documentales rurales o agrícolas producidos en España, presenta el método de fumigación que había puesto a punto el mismo Navarro. En él se hace referencia al carácter venenoso del cianhídrico y a su capacidad para causar la muerte instantánea de los animales (*fotograma*). Pero de esta forma no se quiere mostrar la peligrosidad del tratamiento, sino su eficacia. De hecho, el documento no incluye ninguna referencia explícita a dicho riesgo.

Todavía resulta más sorprendente el continuo incumplimiento de las medidas de seguridad. Los operarios aparecen fumando mientras manipulan los reactivos, no utilizan en ningún caso guantes y se observa el desarrollo de los trabajos de fumigación en un día de fuertes vientos. ¿Qué pudo llevar a Navarro a omitir cualquier referencia a los riesgos y a registrar prácticas totalmente contrarias a las indicadas incluso en los materiales elaborados por él mismo?

Si tenemos en cuenta su formación y su compromiso con el trabajo de divulgación, no podemos alegar desconocimiento, dejadez ni falta de motivación en la preparación del documental. Así pues, la pregunta adquiere un mayor interés, ya que nos introduce en un ámbito de los estudios históricos y sociales de la ciencia con un gran potencial: el de la construcción de la ignorancia, o agnotología. Desde que en 2008 Robert N. Proctor y Londa Schiebinger, ambos de la Universidad Stanford, publicaran *Agnotology: The making and unmaking of ignorance*, ha habido un interés creciente por los diversos mecanismos por los cuales se construye ignorancia en la práctica científica. En la introducción del libro, Proctor indicaba que la ignorancia podía entenderse como un estado original, como una oportunidad para producir conocimiento nuevo que conquistaría el territorio antes ocupado por la ignorancia. Pero la ignorancia también podía generarse en la práctica científica. Por ejemplo, la podían generar de manera premeditada los «mercaderes de la duda» a los que hacían referencia Naomi Oreskes y Erik M. Conway al analizar a científicos que fueron muy activos en la negación del cambio climático o del impacto del tabaco sobre la salud. O podía ser un producto que se generaba de manera pasiva o estructural en la práctica científica. Al centrar nuestra atención en unas preguntas y descartar otras, la ciencia generaba ignorancia sobre estas últimas; al fijar unos parámetros para medir uno u otro proceso también se podía estar generando, de manera más o menos consciente, esta ignorancia.

Sin duda, al obviar la peligrosidad de la fumigación cianhídrica e incluir secuencias en las que se mostraban prácticas en clara contradicción con las medidas de seguridad previamente consensuadas, se generaba ignorancia entre los múltiples públicos de este documental. Estos incluyeron los estudiantes de Navarro, pero también la población rural de los numerosos municipios (Salmerón, Alcocer, Mora de Toledo, etcétera) en los que se impartieron conferencias sobre la plaga del arañuelo del olivo. En todos estos casos, aquel instrumento de comunicación tan potente y en aquel momento tan impactante por novedoso, sirvió a la invisibilización del riesgo asociado a la fumigación cianhídrica.

> **Aquel instrumento de comunicación tan potente, y en aquel momento tan impactante por novedoso, sirvió a la invisibilización del riesgo**

El estudio de la actuación de Navarro en este asunto no nos permite concluir que quisiera ocultar ese riesgo de mane ra premeditada, al estilo de los mercaderes de la duda a los que hacíamos referencia. Podemos entonces interrogarnos sobre la influencia que en este caso pudo tener la construcción pasiva o estructural de la ignorancia. Y, en este sentido, emergen elementos con un gran potencial explicativo.

Uno de esos elementos es la prioridad que dieron los ingenieros agrónomos a la eficacia frente a la seguridad en la regulación de plaguicidas. Ello se hace evidente, por ejemplo, en el registro nacional de pesticidas de 1942, donde no se interrogaba sobre la toxicidad del producto antes de autorizarlo. Pero aún resulta más notable el hecho de que la ley aprobada en 1900 para regular el accidente de trabajo no incluyera los casos de intoxicación y, sobre todo, que quedara restringida al ámbito industrial y comercial. Solo a partir de la década de 1930 fue ya aplicable la categoría de accidente de trabajo a la agricultura. Autores coetáneos denunciaron que este hecho impidió que hubiera datos estadísticos sobre la siniestralidad en el campo y a esta invisibilización del riesgo se sumó la escasa cobertura que tuvo el medio rural en la prensa.

Elementos estructurales como la cultura científica de los agrónomos, que priorizaba la eficacia a la seguridad, los nuevos estándares introducidos en la legislación con la definición de accidente de trabajo, o la prioridad de los medios por el ámbito urbano contribuyeron a invisibilizar el riesgo asociado a este tratamiento insecticida; un tratamiento que, por otro lado, se aplicó sobre una plaga que ha acabado controlándose mediante prácticas que ya estaban al alcance de la agricultura del momento, como la eliminación de la poda del campo (impedir la acción del barrenillo que abre el camino por el que accede y actúa el arañuelo resulta suficiente).

La acción invisibilizadora del documental de Navarro, que fue producto de aquel marco científico, legal y comunicativo, contribuyó a amplificar y agravar dicha construcción de la ignorancia. Episodios como este no pueden más que impulsar la necesaria reflexión crítica sobre los marcos institucionales desde los que producimos nuestro conocimiento científico.

PARA SABER MÁS

Fumigación de los olivos por medio del gas cianhídrico. Leandro Navarro, 1914. Documental disponible en: www.europeana.eu/es/item/08625/FILM00068074c_X

Agnotology: the making and unmaking of ignorance. Dirigido por Robert Proctor y Londa L. Schiebinger. Stanford University Press, 2008.

Mercaderes de la duda. Naomi Oreskes y Erik M. Conway. Capitan Swing, 2020.

Tóxicos invisibles. Dirigido por Ximo Guillem Llobat y Agustí Nieto-Galán. Icaria Editorial, 2020.

Tóxicos: pasado y presente. José Ramón Bertomeu Sánchez. Icaria Editorial, 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

La tardía prohibición de la cerusa. Judith Rainhorn en *IyC*, febrero de 2018.

Los peligros del plomo en España. José Ramón Bertomeu Sánchez en *IyC*, febrero de 2018.

por Arturo Castillo Castillo

Arturo Castillo Castillo es investigador del Centro de Política Ambiental del Imperial College de Londres.



Una estrategia global contra la contaminación por plásticos

Para reducirla de forma drástica, deberán aplicarse medidas simultáneas de política ambiental, industrial y de consumo

La década de 1950, tras la Segunda Guerra Mundial, constituyó el inicio de una etapa de reconstrucción y globalización. La población y el consumo per cápita aumentaron de forma significativa en todo el mundo y, como consecuencia, la generación de residuos se disparó. En la industria en auge, el plástico cumplía numerosas funciones básicas y era el material preferido en los embalajes de alimentos, los nuevos tejidos y múltiples artículos de consumo masivo. Así, mientras que en 1955 se produjeron 4 millones de toneladas de plástico en todo el mundo, en 2018 se alcanzaron los 359 millones.

En la actualidad, al ir aumentando el número de países en proceso de industrialización, la generación de residuos plásticos en todo el mundo va superando cada vez más nuestra capacidad de gestionarlos. En el modelo de «economía lineal» predominante, se valora un material mientras el producto que lo contiene es deseable, pero se lo considera una molestia cuando el producto deja de ser provechoso, lo que representa un paradigma contrario al uso sostenible de recursos. Con el fin de corregir esa tendencia, en los últimos treinta años han surgido numerosas ideas para fomentar la «economía circular», en la que un producto se puede reutilizar o desechar, pero sus materiales permanecen en la economía el máximo de tiempo posible. Sin embargo, hasta ahora la aplicación de estas ideas no ha sido lo suficientemente rápida.

Así lo hemos manifestado varios expertos en un artículo publicado en la revista *Science*. Si continuamos con las prácticas actuales de generación, gestión y fuga de residuos, la cantidad de plásticos que llegará al océano cada año casi se triplicará entre 2016 y 2040: pasará de 11 a 29 millones de toneladas. Y, en el mismo período, el total de los residuos plásticos no gestionados (quemados a cielo abierto o dispersados en el ambiente) aumentará de los 91 a los 239 millones de toneladas.

¿Cómo podemos hacer frente a esa amenza? Ante todo, es importante abandonar la idea de que el problema es solo de gestión de residuos, o que afecta únicamente a los países de bajos ingresos. De forma inadvertida, las estrategias se han concentrado en la gestión de los residuos, lo que, paradójicamente, ha favorecido y legitimado la producción de más basura todavía. La generación de residuos en su forma actual no es ni aceptable ni sostenible. Resulta urgente un cambio global en las normas de producción y de consumo.



Además, es necesario desarrollar estrategias integradas. La cooperación internacional es indispensable para hacer más viables el reciclaje, la reutilización y la gestión de los residuos. Los esfuerzos a medio plazo deben combinar la adaptación de los mecanismos de control ya existentes, la experimentación con acuerdos voluntarios y, finalmente, el desarrollo de nueva regulación. Por ejemplo, hacer aumentar el cumplimiento del acuerdo sobre residuos de operaciones marítimas, en el marco del Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL), permitiría reducir la contaminación por plásticos a través de un mecanismo ya existente. O mejorar el flujo de información y promover la investigación y el desarrollo sobre prevención y reducción de residuos plásticos, dentro de la Convención de Basilea sobre el Transporte Transfronterizo de Residuos, reduciría al mínimo las exportaciones de plástico de dudosa calidad destinados al «reciclaje» en países de bajos ingresos.

Para resolver la parte del problema correspondiente a la brecha entre la generación de residuos y la infraestructura para su gestión en los países con menos recursos, es imprescindible involucrarlos en procesos internacionales de toma de decisiones. Estas deben abarcar desde el diseño de los productos hasta el compromiso con los acuerdos internacionales de responsabilidad ampliada de productores (esto es, su participación en la prevención y la organización de la gestión de los residuos). Solamente así se hallarán alternativas a las sustancias que aumentan la toxicidad y disminuyen el valor del material reciclado. También es necesario adoptar medidas como la sustitución de los artículos de plástico no esenciales y la introducción de estrategias de depósito y devolución de envases, como recoge el artículo 9 de la Directiva Europea 2019/904 relativa a la reducción de los productos de plástico de un solo uso.

Si se aumentan los esfuerzos en todas las intervenciones, es viable que en 2040 logremos reducir la cantidad anual de residuos no gestionados hasta los 44 millones de toneladas (y no los previstos 239 millones, como apuntaba al principio). De estos, 5 millones seguirían alcanzando el océano. Por consiguiente, además de promover estrategias integradas, resulta indispensable que la sociedad en general actualice su concepto de uso y recuperación de materiales en la economía global. IyC

GETTY IMAGES/CURTOICURTO/ISTOCK

por Jaime Martínez Valderrama



Jaime Martínez Valderrama, investigador del Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio de la Universidad de Alicante, es experto en desertificación y modelos de simulación.

Ni la carne es tan mala ni la quinua tan buena

Una mirada al impacto ambiental y social de los sistemas de producción

Vivimos en una época marcada por la prisa y el flujo incesante de información. En este contexto, las consignas triunfan. Sin embargo, entrañan un gran defecto: dejan de lado matices esenciales. En relación a la alimentación y su impacto ambiental y social, tenemos que ser precavidos con los consejos que aseguran la bondad de ciertos productos y la maldad de otros. Analizaremos aquí dos de los consejos estrella actuales: abandonar la carne y comer quinua.

Comencemos por la carne. Varios datos indican que la dieta carnívora es poco sostenible. Para empezar, la producción de carne supone un consumo medio de 15.415, 5988 y 4325 m³ de agua por tonelada, dependiendo de si hablamos de vacuno, cerdo o pollo (el cálculo tiene en cuenta el agua necesaria para cultivar los cereales y legumbres con los que se fabrican los piensos que alimentan al ganado). Por otro lado, se estima que la ganadería es responsable de entre el 8 y el 18 por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, hay otros efectos nada deseables asociados a la producción de carne, como las condiciones en las que viven muchos de estos animales o la deforestación que genera el cultivo de las materias primas utilizadas para fabricar piensos.

La quinua tiene mejor prensa. Se trata de un alimento asociado a culturas milenarias que irradian cierto exotismo. Se la ha calificado de «superalimento», muy apropiado para las dietas vegetarianas, pues contiene todos los aminoácidos esenciales, micronutrientes y vitaminas, y, además, no tiene gluten.

Así que la simplificación está servida: la quinua es buena y la carne es mala. Pero ¿es eso del todo cierto? Pues depende. De hecho, podemos argumentar lo opuesto.

Veamos el lado bueno de la carne. Si nos alejamos de la ganadería intensiva, hallamos otros sistemas de producción que, como el pastoreo, representan ejemplos de sostenibilidad. Mientras pastan al aire libre, los rumiantes ingieren distintos tipos de vegetación que, de otra manera, no serían aprovechados. Con ello logran algo único: transformar lignina y celulosa en proteína. Ninguna máquina es capaz de realizar ese proceso. Además, descargan el paisaje de materiales inflamables, reduciendo el riesgo de incendios forestales. Y, conforme se desplazan, van abonando el campo con sus excrementos. Justamente a eso aspiran todas las iniciativas de la cacareada economía circular: que los desperdicios de uno sean el alimento del otro. Este tipo de ganadería suele producir alimentos de gran calidad, como el cerdo ibérico.



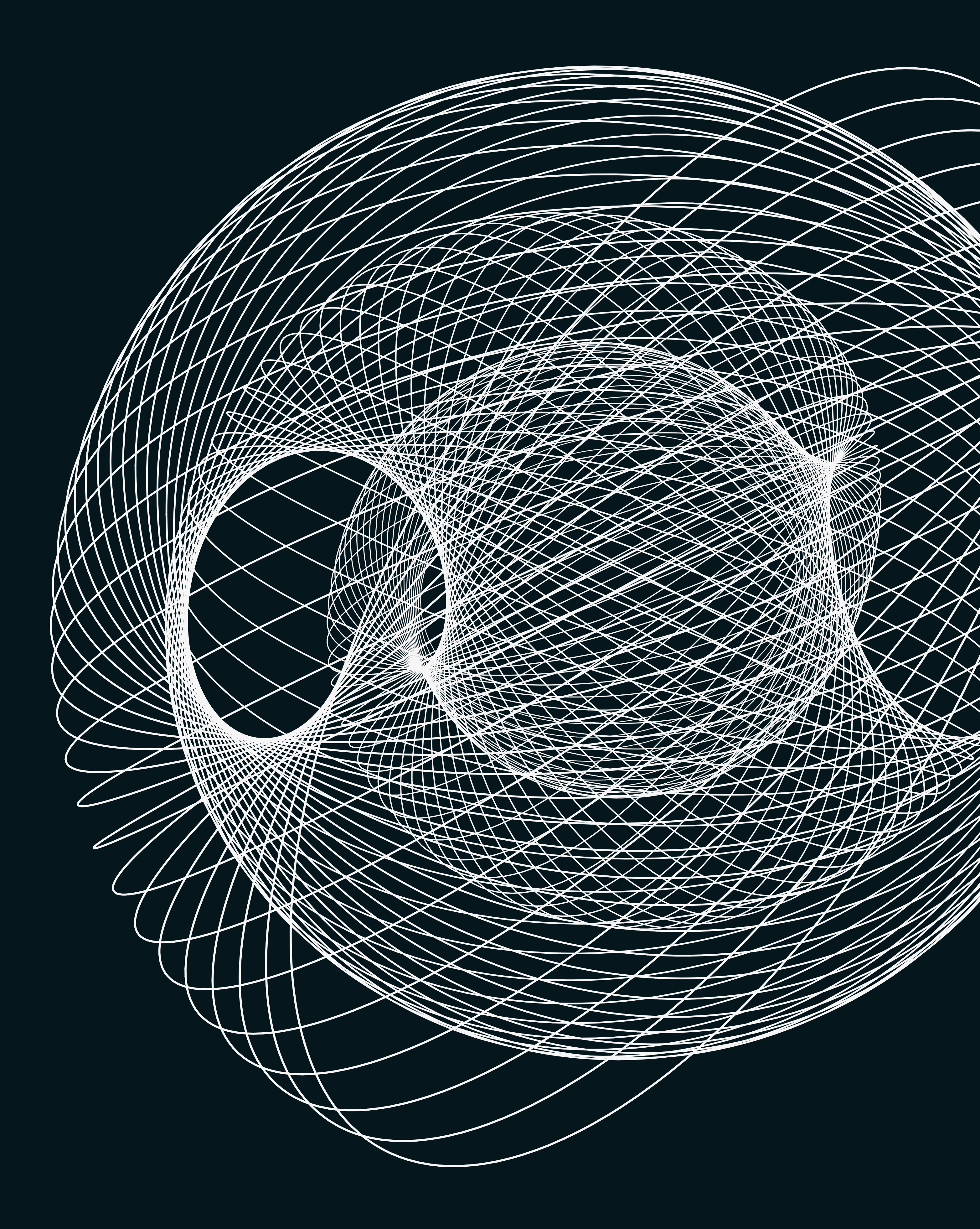
GETTY IMAGES/HADYNYAH/ISTOCK

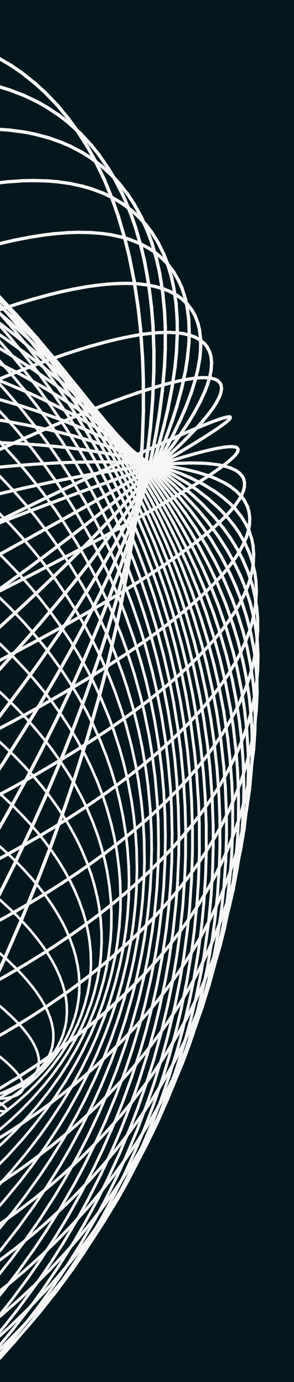
¿Cuál es el lado oscuro de la quinua? Su creciente demanda ha desfigurado el sistema de producción original. En las últimas cuatro décadas, Perú y Bolivia (los principales productores) han aumentado la producción en un 252 y un 612 por ciento, respectivamente, con un crecimiento de la superficie de cultivo de un 124 y un 440 por ciento. Veamos las consecuencias ambientales y sociales de estos cambios.

En los desiertos de altura donde se cultiva la quinua, el clima es extremo (lluvias escasas, frío y viento). Durante siglos, la población local ha sobrevivido gracias a la quinua, cultivada sin medios mecánicos y con un exquisito cuidado de los tiempos, con el fin de dejar descansar la tierra para que se recargase de agua y nutrientes. Pero la fiebre de la quinua ha propulsado la intensificación y expansión de este cultivo. El uso de maquinaria pesada, fertilizantes y pesticidas, la eliminación de la ganadería que abonaba el campo, la invasión de pastizales y la disminución del barbecho han disparado la erosión y el deterioro del suelo. La selección de las variedades más productivas está provocando la pérdida de agrobiodiversidad. La población local, lejos de enriquecerse, ha perdido su principal fuente de proteína: la quinua tiene precios prohibitivos, la mayor parte se exporta y las llamas tienen menos espacio para pastar. Para colmo, muchas de las tierras que estaban en manos de las comunidades locales son ahora propiedades privadas. A la luz de estos hechos, ¿les sigue pareciendo que nuestro plato de quinua es un alimento sostenible?

Estos dos casos nos revelan que nuestro consumo no debería estar condicionado solo por el tipo de alimento, sino también por la manera en la que se produce. El principal problema radica en los sistemas a gran escala, que persigue acelerar los ciclos de producción al menor coste posible.

La solución pasa por involucrar al consumidor y hacerle consciente de las consecuencias de sus decisiones. Contando con que cada vez somos más sensibles a nuestra huella ambiental y social, necesitamos un sistema fiable de trazabilidad y certificación de los alimentos. Es un reto complejo, donde acechan los fraudes y los errores conceptuales, pero que necesitamos resolver. Sucumbiendo a la brevedad de nuestros tiempos, terminaría diciendo: ¿carne o quinua? Depende ¿de qué depende? De según como se mire, todo depende. IyC





HISTORIA DE LA MATEMÁTICA

DE LA MANZANA DE NEWTON A LOS DRONES DE AMAZON

El tratamiento matemático de la mecánica clásica ha cambiado de manera notable a lo largo de los siglos. En los últimos años, una formulación en términos puramente geométricos ha dado lugar a nuevas aplicaciones en robótica e ingeniería

Fernando Jiménez Alburquerque y Cristina Sardón

LA MECÁNICA GEOMÉTRICA, una disciplina relativamente joven, ha permitido estudiar numerosos problemas mecánicos a partir de las propiedades geométricas y topológicas de ciertos espacios abstractos.

Fernando Jiménez Alburquerque es profesor en el Departamento de Matemática Aplicada a la Ingeniería Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid. Su investigación se centra en la aplicación de métodos geométricos para resolver numéricamente ecuaciones diferenciales.

Cristina Sardón es profesora en el mismo centro. Investiga en mecánica geométrica y en la aplicación de álgebras de Lie y geometría de Dirac al estudio de sistemas dinámicos.



CONSIDERE LA SIGUIENTE SITUACIÓN COTIDIANA: USTED SE ENCUENTRA EN la parada del autobús y desea saber cuándo pasará el siguiente. Para ello, saca el teléfono móvil del bolsillo, abre una aplicación y esta le indica que el próximo autobús llegará dentro de siete minutos. En efecto, pasado ese tiempo el vehículo se presenta en la parada.

Para ello es necesario que el autobús se encuentre equipado con un localizador GPS, que el localizador emita una señal electromagnética triangulada por varios satélites, y que estos repliquen la señal de manera sincronizada para que nuestro teléfono móvil pueda recibirla e interpretarla a través de los algoritmos apropiados.

Todo un prodigio que combina distintas ramas de la ciencia fundamental y la tecnología, desde el electromagnetismo hasta la ingeniería aeroespacial pasando por la relatividad general, la cual es necesaria para que la señal de los satélites alcance la precisión requerida. Sin embargo, desde un punto de vista más básico, todo comienza con dos cuerpos, el autobús y el satélite, que avanzan por el espacio a una velocidad mucho menor que la de la luz. Este es el régimen del que se ocupa la mecánica clásica, la rama más ampliamente conocida y estudiada de la física y una de las áreas más antiguas de la ciencia.

En el imaginario popular, la mecánica clásica suele verse reducida a las leyes de Newton y a la resolución de problemas simples, como péndulos o planos inclinados. Sin embargo, a lo largo de los siglos su formulación matemática ha pasado por varias encarnaciones muy distintas. Estas comprenden desde la mecánica vectorial que aprendemos en la escuela hasta otras versiones mucho más abstractas, como la mecánica analítica introducida en el siglo XVIII por Joseph-Louis Lagrange y desarrollada en el siglo XIX por William Rowan Hamilton, entre otros. Tanto estas formulaciones como otras posteriores han impulsado el desarrollo de las matemáticas en las que se basan, al tiempo que han permitido ampliar enormemente el dominio de aplicación de la mecánica.

Un ejemplo reciente nos lo proporcionan los drones, esos «insectos» de plástico y metal movidos por varias hélices que, cada vez más a menudo, vemos sobrevolando nuestras cabezas con su zumbido característico. Estos ingenios ganaron relevancia cuando Amazon se propuso emplearlos en su servicio de reparto, pero sus aplicaciones van mucho más allá: traslado de objetos, vigilancia, reconocimiento de terrenos inaccesibles, etcétera. Incluso han desempeñado funciones de control durante esta pandemia para detectar grandes agrupamientos de personas o fiestas ilegales. Desde el punto de vista de la mecánica, un dron es un cuerpo rígido caracterizado por una posición y una orientación en el espacio, y de su estudio y control se ocupa una de las formulaciones modernas de la mecánica. Esta se conoce con el nombre de mecánica geométrica y, como sugiere su nombre, se basa en abordar los problemas de la mecánica con herramientas de geometría avanzada.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/OCTOMESECAM/ISTOCK

EN SÍNTESIS

La mecánica clásica suele concebirse como una disciplina limitada a las leyes de Newton y al cálculo vectorial que aprendemos en la secundaria. Sin embargo, su tratamiento matemático abarca formalismos mucho más ricos y potentes.

Una de sus encarnaciones actuales se basa en el empleo de la geometría diferencial, el área de las matemáticas que estudia las propiedades de los espacios curvos. Esta formulación se conoce como mecánica geométrica.

Esta nueva disciplina ha contribuido a desarrollar varios ámbitos de la geometría moderna, como la geometría simpléctica. Al mismo tiempo, ha encontrado numerosas aplicaciones en campos como la robótica o el control de drones.

En concreto, la mecánica geométrica puede definirse como la aplicación de la geometría diferencial en problemas de mecánica clásica. Se trata de una disciplina relativamente joven y cuya versión actual comenzó a gestarse hace apenas unas décadas de la mano de matemáticos tan célebres como Vladimir Arnold, Stephen Smale, Jerrold Marsden y Alan Weinstein, entre otros. Hoy la mecánica geométrica se aplica a todo tipo de problemas que serían inabordables si nos limitásemos a aplicar el formalismo de Newton. Tales aplicaciones incluyen campos como la robótica y, a su vez, han dado pie al nacimiento de nuevas áreas interdisciplinares a caballo entre las matemáticas y la ingeniería, como la teoría de control y la teoría de control óptimo.

UNA CIENCIA MILENARIA

La mecánica, el estudio de cómo y por qué se mueven los cuerpos, constituye una de las ramas más antiguas de toda la ciencia. Desde tiempos inmemoriales, los humanos hemos construido lanzas, flechas, carros de guerra o pirámides, y para ello hemos tenido que basar todos sus elementos en las leyes de la mecánica clásica. Más adelante, en los siglos XVI y XVII, esta disciplina comenzó a aplicarse al movimiento de los cuerpos celestes gracias a las aportaciones de Copérnico, Galileo, Kepler y Newton.

En lo que respecta a su formulación matemática, un primer ejemplo lo hallamos en la segunda ley de Newton, el mantra cantarín que todos llevamos en el corazón desde la adolescencia y que establece que «fuerza es igual a masa por aceleración». La aceleración es la derivada con respecto al tiempo de la velocidad, que a su vez es la derivada de la posición, por lo que hoy solemos ver la segunda ley de Newton como una ecuación diferencial de segundo orden. Sin embargo, cuando abrimos un ejemplar de los *Principia*, la monumental obra de 1687 donde Newton estableció sus tres leyes de la mecánica y la ley de la gravitación universal, la sorpresa es mayúscula: en ella no hay rastro de derivadas, integrales ni ecuaciones diferenciales. Solo hay puntos y rectas, segmentos y vértices, distancias y ángulos; es decir, pura geometría. La combinación de geometría simple y mecánica es lo que hoy se conoce como mecánica vectorial. Un vector es un objeto geométrico caracterizado no solo por su magnitud («grande» o «pequeño»), sino también por una dirección y un sentido en el espacio («hacia arriba» o «hacia abajo», por ejemplo). Decimos que una fuerza es un vector ya que, para especificarla, hemos de determinar esas tres características.

La formulación vectorial de la mecánica presenta la ventaja de que su formalismo matemático se ajusta a nuestra intuición sobre cómo se mueven los objetos en el espacio físico de tres dimensiones. Cuando empujamos un mesa, la fuerza que aplicamos se corresponde con el vector que dibujamos en el diagrama de fuerzas que nos enseñan a trazar en la escuela y a partir del cual definiremos los cálculos que tenemos que llevar a cabo. Sin embargo, la mecánica de Newton tiene el inconveniente de que puede tornarse demasiado farragosa o incluso intratable en numerosas situaciones.

El formalismo newtoniano experimentó una transformación radical en el siglo XVIII en favor de una formulación más abstracta pero también mucho más potente. Dicha formulación se conoce como «mecánica analítica» y fue introducida por el matemático Joseph-Luis Lagrange en su tratado homónimo, en cuyo prefacio comenta:

> *No se encontrarán figuras en este trabajo. Los métodos que aquí presento no requieren argumentos geométricos o mecánicos, sino únicamente operaciones algebraicas sujetas a un procedimiento uniforme y regular. Aquellos que aprecien el análisis matemático verán con placer cómo la mecánica se convierte en una de sus ramas y, por tanto, reconocerán que he aumentado sus dominios.*

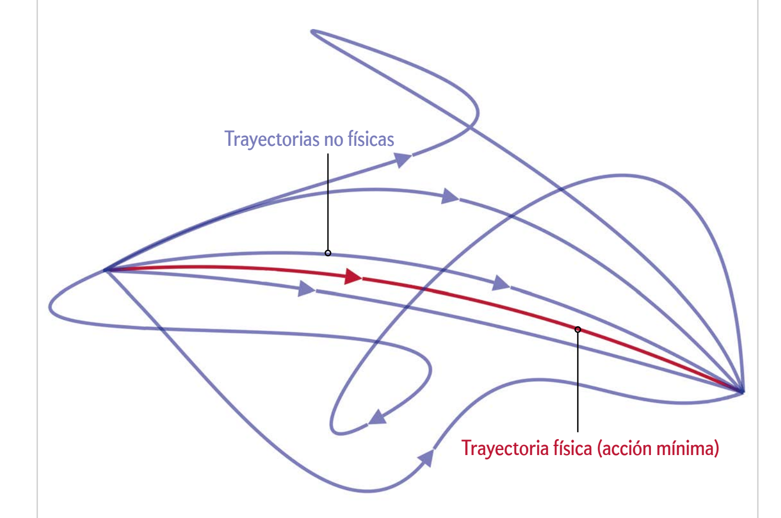
La idea de Lagrange fue considerar una función a partir de la cual podía derivarse todo el comportamiento de un sistema mecánico. Esta se conoce hoy como función lagrangiana, L, y viene dada por la expresión

$$L = T - V \, ,$$

MECÁNICA Y ANÁLISIS

Más allá de Newton

Las leyes de Newton permiten determinar cómo se mueve un cuerpo a partir de las fuerzas que actúan sobre él. Sin embargo, con el paso de los siglos estas leyes han dejado paso a otras formulaciones de la mecánica más abstractas pero más potentes. Una de ellas fue introducida en el siglo XVIII por el matemático ítalo-francés Joseph-Louis Lagrange, quien reformuló la mecánica en términos del principio de mínima acción. Esta idea prescindía de la mecánica vectorial de Newton y permitió relacionar la mecánica clásica con el análisis matemático, la disciplina encargada de estudiar el comportamiento de las funciones.



El principio de mínima acción se basa en considerar todas las trayectorias posibles que podría seguir un cuerpo entre dos puntos (*lila*) y asociar a cada una de ellas una cantidad matemática, la «acción», relacionada con la energía cinética y potencial del objeto. Las leyes de la naturaleza son tales que, de todas las trayectorias posibles, un cuerpo seguirá siempre aquella que haga que la acción sea mínima (*rojo*). Con el paso del tiempo, este formalismo trascendería los límites de la propia mecánica clásica y permitiría el desarrollo de otras áreas de la física, como la relatividad general o la teoría cuántica de campos.

donde T representa la energía cinética del sistema y V denota la energía potencial. La primera está asociada al movimiento de las partículas, y será mayor cuanto mayor sea su velocidad. La segunda queda determinada por la interacción de las partículas con un campo de fuerzas, como el gravitatorio o eléctrico, y desde un punto de vista matemático solo es una función de la posición. Por tanto, si tenemos un sistema formado por varias partículas, la función lagrangiana dependerá de sus posiciones, las cuales denotaremos colectivamente como q^A, y de sus velocidades, v^A. En otras palabras:

$$L = L(q^A, v^A) .$$

En la mecánica de Lagrange, esta función codifica por completo la dinámica del sistema. Una primera diferencia con respecto al formalismo de Newton reside en que la función lagrangiana no es vectorial, sino «escalar», el término empleado en matemáticas para denotar una cantidad que, como la energía, solo tiene magnitud, pero no dirección.

Una vez conocida la función lagrangiana, es posible aplicar un procedimiento «ciego» que permite derivar la evolución del sistema. Aquí nos encontramos con otro aspecto clave del formalismo de Lagrange: dicho procedimiento es uno de optimización; es decir, uno que minimiza el valor de cierta cantidad. En concreto, a partir de L puede calcularse una expresión, la «acción» (la integral en el tiempo de la función lagrangiana), y la evolución del sistema viene siempre dada por aquellas trayectorias que hacen que la acción sea mínima.

Las ecuaciones que dan como resultado esas trayectorias de acción mínima se conocen como ecuaciones de Euler-Lagrange. Desde un punto de vista matemático, son ecuaciones diferenciales de segundo orden; es decir, incluyen derivadas segundas con respecto al tiempo. Las ecuaciones de Euler-Lagrange supusieron el principio del cálculo de variaciones, un método para calcular trayectorias basado en encontrar funciones que minimicen una cantidad dada. Dicho procedimiento es similar en espíritu al que aprendemos en cálculo elemental y que afirma que, cuando una función alcanza sus valores máximos o mínimos, su derivada es cero.

Una de las ventajas de «geometrizar» la mecánica es que permite describir la evolución de los sistemas dinámicos mediante ecuaciones de carácter verdaderamente universal

La formulación de Euler-Lagrange se planteó por primera vez en el estudio de las curvas isócronas: aquellas trayectorias que cumplen que, cuando una partícula se desliza por ellas sin rozamiento, el tiempo que tarda en llegar al suelo es siempre el mismo con independencia de cuál sea la altura de la que parta. El 12 de agosto de 1755, Lagrange envió una carta a Leonhard Euler con su solución al problema. El 6 de septiembre Euler contestó y, en posterior correspondencia, juntos desarrollaron el cálculo de variaciones y su aplicación a la mecánica. La resolución de Lagrange se basaba en el principio de mínima acción que ya había avanzado el matemático Pierre Louis Maupertuis y según el cual todos los fenómenos naturales podían ser descritos como procesos que minimizan una cierta cantidad (la acción).

De esta manera, el formalismo de Lagrange renunció a los vectores, ángulos y demás elementos geométricos de la formulación de Newton y transformó la mecánica en un problema de análisis, la rama de las matemáticas que estudia el comportamiento de las funciones. Por supuesto, al abordar una misma situación con las leyes de Newton y de Lagrange, obtendremos siempre el mismo resultado. Sin embargo, el formalismo de Lagrange simplificaba de manera considerable la resolución de numerosos problemas y demostraría tener un ámbito de aplicación mucho más amplio que la mecánica de Newton.

DE LAGRANGE A HAMILTON

Ya entrados en el siglo XIX, el matemático irlandés William Rowan Hamilton mostró interés por reformular los métodos de Lagrange. Expresó su deseo en un trabajo de 1834 titulado *Sobre un método general en dinámica*, donde escribió:

> *Las leyes del movimiento de los cuerpos son un problema de tal interés e importancia que han atraído la atención de los más eminentes matemáticos, desde Galileo hasta la maravillosa extensión dada por Newton. Entre los sucesores de estos ilustres hombres, Lagrange ha hecho probablemente más que ningún otro analista por dar extensión y armonía a tales investigaciones deductivas, mostrando que las más diversas consecuencias respecto al movimiento de los cuerpos pueden ser derivadas de una fórmula esencial. La belleza del método es tan apropiada a la dignidad del resultado que hace de este gran trabajo una especie de poema científico.*

La formulación de la mecánica de Hamilton es similar en espíritu a la de Lagrange, pero parte de una función distinta. Dicha función se conoce como hamiltoniano, H, y corresponde a la energía total del sistema:

$$H = T + V .$$

Otra diferencia clave reside en las variables de las que depende la función. Recordemos que la función lagrangiana dependía de las posiciones (q^A) y de las velocidades (v^A), las cuales son la derivada de las primeras. En cambio, el hamiltoniano depende de las posiciones, q^A, y de los momentos, p_A:

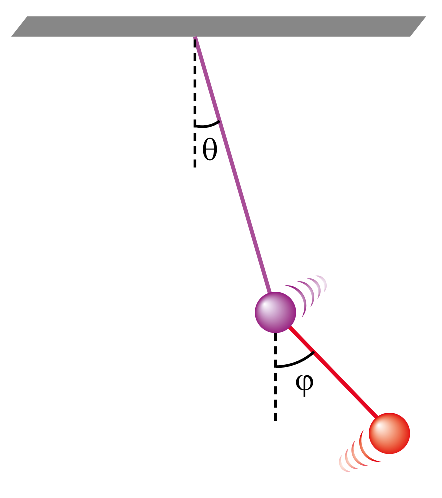
$$H = H(q^A, p_A) .$$

Estos últimos pueden entenderse como una variable relacionada con la velocidad (en el caso más sencillo de una partícula de masa m y velocidad v, el momento p viene dado por la conocida expresión $p = mv$), pero, en el formalismo de Hamilton, se consideran variables independientes de la posición.

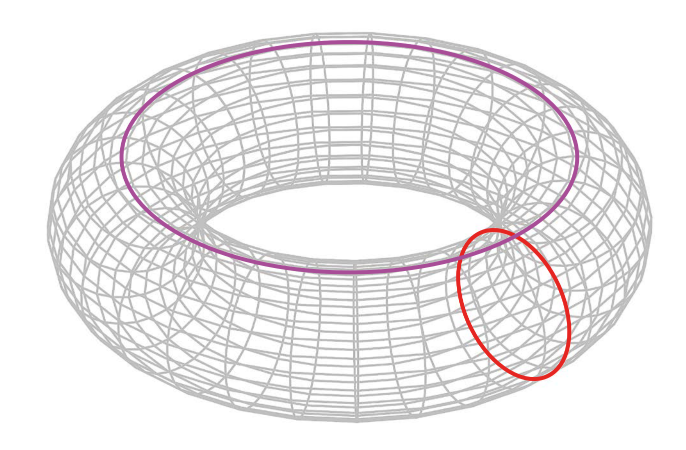
Al igual que en la formulación lagrangiana, el hamiltoniano permite definir un procedimiento analítico que dicta la evolución del sistema. Pero si las ecuaciones de Euler-Lagrange eran de segundo orden, las ecuaciones de Hamilton son de primer orden; es decir, solo incluyen derivadas primeras de las posiciones y de los momentos con respecto al tiempo. Tales ecuaciones suelen ser más sencillas de resolver; sin embargo, el precio que habremos de pagar es que ahora tendremos el doble de ellas.

Más allá del espacio físico

El objetivo de la mecánica es predecir cómo evolucionan los cuerpos en el espacio físico de tres dimensiones. No obstante, la trayectoria de un objeto puede también estudiarse en términos de ciertos espacios abstractos con geometrías y topologías más complejas. Esta idea constituye la base de la mecánica geométrica, un formalismo relativamente joven que en los últimos años ha permitido abordar nuevos problemas en robótica o ingeniería, entre otras áreas. Este ejemplo sencillo ilustra la idea.



Espacio físico
El estado de un péndulo doble en el espacio físico puede especificarse por medio de dos ángulos: el que subtiende cada una de las varillas con respecto a la vertical. Ambos ángulos son independientes: una vez especificado el primero (θ), el segundo (φ) podrá tomar en principio cualquier valor.



Espacio de configuraciones
Cada uno de esos ángulos puede también interpretarse como un punto en una circunferencia. El espacio que «barren» dos circunferencias independientes es un toro, o una superficie con forma de rosquilla. Por tanto, estudiar las posibles trayectorias del péndulo doble equivale a estudiar trayectorias en esta geometría.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (*péndulo*); WIKIMEDIA COMMONS/KRISHNAVEDALA/CC0 1.0/DOMINIO PÚBLICO (*toro*)

Al igual que ocurría con las formulaciones de Newton y de Lagrange, el formalismo lagrangiano y el hamiltoniano son en principio equivalentes. Por tanto, la elección por uno u otro deberá basarse en las características del problema en cuestión. En todo caso, las formulaciones lagrangiana y hamiltoniana se demostrarían tan poderosas que su ámbito de aplicación acabó trascendiendo la mecánica clásica. Por ejemplo, a principios del siglo XX, el matemático David Hilbert demostró cómo podía usarse el formalismo de Lagrange para obtener las ecuaciones de la relatividad general de Einstein a partir de un principio variacional, un formalismo que sigue siendo el empleado hoy en día en el estudio teórico de la gravedad. Por su parte, la formulación hamiltoniana resultaría clave en el desarrollo de la mecánica cuántica.

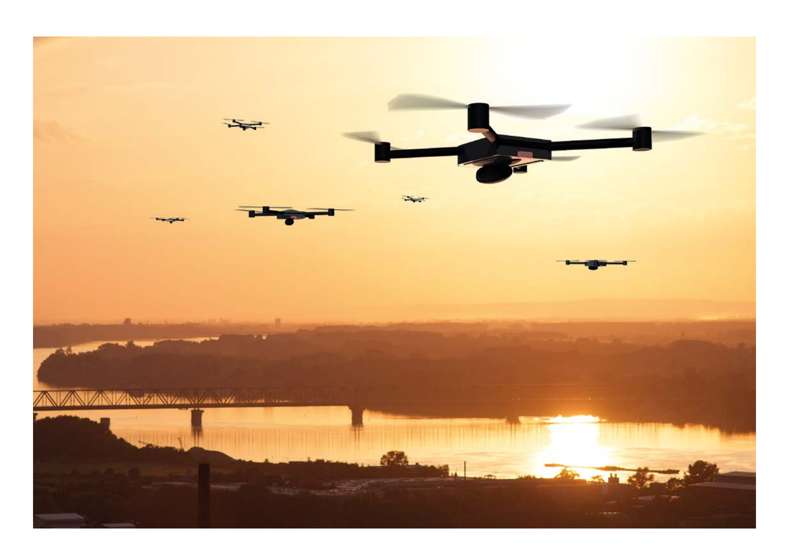
EL REGRESO DE LA GEOMETRÍA

El siglo XX conoció la expansión de la geometría diferencial, la rama de las matemáticas que emplea el cálculo diferencial para estudiar aquellos espacios geométricos que podemos denominar «curvos». Su origen se remonta a los trabajos de Carl Friedrich Gauss, Nikolái Lobachevski y János Bolyai, quienes en el siglo XIX se propusieron estudiar qué ocurriría al renunciar a los postulados clásicos de la geometría enunciados por Euclides hacia el año 300 antes de nuestra era. Uno de esos postulados establece que, dada una recta y un punto exterior a ella, por este solo pasará una recta paralela a la anterior. Esta noción se ajusta a las propiedades del espacio físico al que están acostumbrados nuestros sentidos. Sin embargo, es posible renunciar a dicho postulado sin caer en contradicciones, lo que lleva a considerar espacios geométricos con otras propiedades.

En el caso de un espacio bidimensional, un ejemplo sencillo de esta nueva clase de geometrías nos lo proporciona la superficie de una esfera. En la escuela aprendemos que los ángulos de un triángulo suman siempre 180 grados. Sin embargo, esto solo es cierto en una superficie plana, o «euclídea». Pero, como podemos comprobar fácilmente echando un vistazo a los meridianos y los paralelos de un globo terráqueo, sobre la superficie de una esfera es posible trazar triángulos cuyos ángulos tienen todos 90 grados.

¿Qué relación guardan estas consideraciones geométricas con la mecánica clásica? En general, estamos acostumbrados a pensar en un problema mecánico como en uno que describe las trayectorias que siguen las partículas en el espacio físico (euclídeo) de tres dimensiones. Sin embargo, los formalismos de Lagrange y Hamilton hicieron posible reformular tales problemas en términos de trayectorias en un espacio abstracto. Dicho espacio es en general curvo y puede tener muchas más dimensiones que las tres que asociamos al espacio físico.

Consideremos el caso de un péndulo doble: una masa suspendida de una varilla oscilante, de la cual cuelga a su vez otro péndulo formado por otra varilla y otra masa. En el espacio físico, la posición de las dos masas en un momento dado puede describirse por medio del ángulo que subtiende cada una de las dos varillas con respecto a la vertical. Si denotamos dichos ángulos como θ y ϕ, ¿podemos asociar una geometría intrínseca al espacio formado por estas dos variables?



LA MECÁNICA GEOMÉTRICA ha permitido el desarrollo de varias aplicaciones en ingeniería que resultarían inabordables con las técnicas tradicionales. Una de las más estudiadas hoy en día atañe al control de bandadas de drones que han de volar en formación.

GETTY IMAGES/AEROGONDO/ISTOCK

La respuesta es afirmativa. Cada posición posible de nuestro péndulo viene dada por dos ángulos independientes. El primero puede asociarse a un punto en una circunferencia y, una vez fijado este, el segundo corresponderá a otro punto en una segunda circunferencia independiente de la anterior. La situación en la que tenemos dos circunferencias por las que podemos movernos de manera independiente describe la geometría de un «toro», o una superficie con forma de rosquilla. Por tanto, estudiar la dinámica de un péndulo doble equivale a analizar las trayectorias posibles sobre un toro. Tales espacios abstractos reciben el nombre genérico de «espacios de configuraciones».

Existen espacios de configuraciones de varios tipos. En la mecánica hamiltoniana, las variables que describen el estado de un sistema son las posiciones, q^A, y los momentos, p_A. A su vez, estas variables pueden considerarse las coordenadas de un espacio abstracto conocido como «espacio de fases». En el caso de un péndulo simple, por ejemplo, el estado del sistema en un instante dado queda determinado por la posición de la masa (dada por el ángulo del péndulo con respecto a la vertical, θ) y por su momento (p). Así pues, las variables θ y p parametrizan un espacio, distinto del espacio físico, en el cual también podemos trazar la evolución del sistema. Por ejemplo, para pequeñas oscilaciones, la trayectoria del péndulo en el espacio físico se traduce, en el espacio de fases, en una trayectoria circular. Para oscilaciones mayores, dicha curva adquiere formas más complejas.

UNA NUEVA GEOMETRÍA

En las últimas décadas, el estudio de estos espacios abstractos ha abierto la puerta a emplear herramientas geométricas avanzadas para abordar problemas mecánicos. Ello se debe a que el espacio de fases de la mecánica hamiltoniana, formado por pares de posiciones y momentos, admite de manera natural una estructura adicional. Dicha estructura es el objeto de estudio de una rama moderna de la geometría diferencial conocida como «geometría simpléctica», la cual constituye la base teórica de la formulación actual de la mecánica.

La geometría de un espacio curvo genérico queda caracterizada por la métrica, el objeto matemático que permite calcular la distancia entre dos puntos. Dicho objeto es simétrico, en el sentido de que la distancia entre un punto *A* y un punto *B* es siempre igual a la distancia entre *B* y *A*. En términos muy simplificados, diremos que un espacio geométrico es además simpléctico si en él podemos encontrar cierta manera bien definida de medir volúmenes en el espacio de fases. El objeto matemático que nos permite hacer esto se conoce como forma simpléctica, y podemos pensar en él como en el equivalente a la métrica de la geometría ordinaria, solo que con propiedades antisimétricas en vez de simétricas, entre otras. Además, el hecho de que un sistema mecánico obedezca unas ecuaciones determinadas (las ecuaciones de Hamilton) hace que su evolución en el tiempo preserve dicha forma simpléctica. Esta propiedad constituye una enorme ventaja a la hora de estudiar tales sistemas.

Hoy, tanto la mecánica lagrangiana como la hamiltoniana admiten una formulación en términos de geometría simpléctica. Las ideas que conectan la mecánica y la geometría diferencial pueden rastrearse hasta el siglo XIX y los trabajos de matemátcos como Henri Poincaré. Sin embargo, su forma contemporánea se debe, entre otras, a las aportaciones que a finales del siglo pasado lograron los matemáticos Jerrold Marsden, fallecido en 2010 y quien desarrolló la mayor parte de su carrera en el Instituto de Tecnología de California, y Alan Weinstein, de la Universidad de California en Berkeley. Por esta razón, la mecánica geométrica se conoce también como «matemática californiana». Los intereses de Marsden se concentraron en las matemáticas aplicadas, la mecánica de fluidos, la elasticidad y la teoría de campos, entre otras áreas. Por su lado, Alan Weinstein ha sido uno de los mayores impulsores de la mecánica geométrica.

Una de las ventajas de «geometrizar» la mecánica de esta manera es que nos permite tratar la evolución de los sistemas dinámicos sin hacer referencia a ninguna variable en absoluto; es decir, sin incluir de manera explícita las posiciones y los momentos en nuestra descripción matemática, lo que conduce a ecuaciones de carácter verdaderamente universal. No importa cuán complejo o exótico sea el espacio que describe nuestro sistema: siempre podremos encontrar una herramienta geométrica bien definida para saber cómo se comporta. En los últimos años, este formalismo ha permitido abordar todo tipo de situaciones que serían intratables de otro modo.

GEOMETRÍA Y CONTROL

Así pues, hoy disponemos de un nuevo formalismo geométrico para estudiar el movimiento de los cuerpos. Desde un punto de vista práctico, la siguiente pregunta reviste gran interés: ¿podemos influir en ese movimiento? La respuesta es afirmativa: es posible aplicar fuerzas externas, las cuales aparecerán reflejadas en las ecuaciones dinámicas por medio de lo que se conoce como «variables de control». Como ejemplo básico podemos pensar en un automóvil: para ponerlo en marcha, el motor deberá ejercer una fuerza, cuya magnitud y dirección quedarán determinadas por los mecanismos que conectan el acelerador y el volante con el motor y las ruedas.

En términos matemáticos, un problema de control consta de un conjunto de ecuaciones dinámicas, las cuales incluirán las variables de control, junto con un punto inicial del sistema y uno final que queremos que alcance. Al mismo tiempo, numerosas aplicaciones requieren combinar un problema de control con

uno de optimización: uno en el que cierta cantidad debe hacerse máxima o mínima. Por ejemplo, cuando deseamos lanzar un cohete a la Luna, no basta con conocer el punto de partida y el de llegada, sino que resulta vital que la nave haga el recorrido utilizando la menor cantidad posible de combustible. Este tipo de situaciones se conocen como «problemas de control óptimo» y aparecen de manera constante en ciencias fundamentales, ingeniería e incluso economía; por ejemplo, para generar cierto producto químico en el menor tiempo posible usando una cantidad mínima de catalizador, o para aumentar las ventas de un producto invirtiendo lo mínimo en publicidad.

En una de las páginas más brillantes de las matemáticas modernas, Lev Pontryagin, matemático ruso ciego desde los catorce años, demostró en 1956 un resultado conocido como «principio del máximo». Este establece que las soluciones a un problema de control óptimo obedecen también las ecuaciones de Hamilton para cierto tipo de espacios. Gracias a ello, hoy es posible abordar tales problemas de manera muy eficiente con las herramientas de la mecánica geométrica.

Para ver por qué, pensemos en un robot. La manera más sencilla de modelizar un robot es considerarlo como una colección de cuerpos rígidos, o «conectores», unidos entre sí por medio de juntas, sobre las cuales actuará la fuerza (controlada) de los motores. Definir la dinámica de un robot de este modo se convierte en una tarea difícil, ya que hemos de tener en cuenta el movimiento de los conectores y calcular la fuerza necesaria sobre las juntas para controlar el movimiento; una dificultad que aumentará con el número de conectores y juntas. En el pasado, el problema se abordaba mediante un enfoque newtoniano basado en calcular todos los pares de fuerzas y demás cantidades asociadas al movimiento de los cuerpos rígidos. Sin embargo, el problema se agrava computacionalmente conforme crece el número de juntas y conectores, ya que entonces la cantidad de ecuaciones se dispara.

La geometría y el cálculo variacional permiten simplificar enormemente el problema. En términos sencillos, es posible definir una función lagrangiana del conjunto de conectores y juntas, tras lo cual basta con aplicar las ecuaciones de Euler-Lagrange para determinar la evolución del sistema, incluidas las variables de control. Este ejemplo pone de manifiesto que la mecánica geométrica no solo ha contribuido a simplificar problemas que de otro modo tendrían un enorme coste computacional, sino que ha permitido establecer un fundamento sólido para una ciencia tan relevante como la robótica.

Retomando el ejemplo de los drones que mencionábamos al principio, la mecánica geométrica ha permitido desarrollar varias herramientas para describir su dinámica. En líneas generales, el estado de un dron queda determinado por la posición de su centro de masas y por la orientación del vehículo. El espacio usado para describir la orientación de un cuerpo rígido se conoce con el nombre técnico de $SO(3)$, o «grupo ortogonal especial de dimensión 3». En términos matemáticos, este espacio corresponde a las matrices de dimensión 3×3 que implementan rotaciones en un espacio euclídeo tridimensional. Por otro lado, el centro de masas del dron evoluciona en ese espacio euclídeo de tres dimensiones; es decir, en el «producto» de tres copias de la recta real, o $\mathbf{R}^3$. Por tanto, el espacio de configuraciones de un dron viene dado por $\mathbf{R}^3 \times SO(3)$: el dron vuela por el aire y, en cada punto, puede efectuar una rotación. Teniendo en cuenta que el objeto estará sometido a la fuerza de la gravedad y a las aplicadas por los motores, lo anterior se convierte en un problema de control que podemos resolver con las herramientas de la mecánica geométrica. Hoy, varias líneas de investigación intentan abordar este problema desde distintas perspectivas: estabilización de la trayectoria del dron, optimización en el uso de energía, estabilidad de la rotación del aparato, etcétera.

Una extensión importante concierne al caso en que varios drones han de volar en formación. En esta situación, el objetivo consiste en encontrar un procedimiento matemático que ayude a elegir variables de control que mantengan la bandada de drones en la formación deseada. Además, los aparatos pueden encontrarse con varios obstáculos durante su vuelo, ya se trate de una montaña o de un volumen de aire turbulento que sea conveniente evitar. En tal caso, la «flexibilidad» del conjunto de drones (cuán rápido sean capaces de adoptar una nueva formación para evitar un obstáculo) constituye uno de los problemas más estudiados hoy en día en mecánica geométrica y teoría de control.

Este campo, que podemos denominar «manipulación y control geométrico» de drones, ha sido desarrollado en los últimos años gracias a las investigaciones pioneras de Taeyoung Lee, de la Universidad George Washington, y Vijay Kumar, de la Universidad de Pensilvania. En 2012, por ejemplo, Lee definió una nueva manera de controlar la orientación de un cuerpo rígido que era aplicable incluso cuando el error inicial en la orientación (la diferencia entre la orientación deseada y la que en realidad adopta el aparato) era relativamente grande. Otro destacado experto internacional es Aníbal Ollero, de la Universidad de Sevilla, donde dirige el Grupo de Robótica, Visión y Control. Este mismo año, su equipo ha propuesto un nuevo diseño de drones alados cuyo funcionamiento está inspirado en el de los propios pájaros. Al aprovechar el viento y los flujos de aire, estos robots deberían ser capaces de maniobrar mejor, transportar más carga y volar durante más tiempo que los drones ordinarios.

Así pues, hoy la mecánica geométrica está arrojando luz sobre ciertos problemas que van más allá de los puramente teóricos e incluso dotándolos de cierto toque poético: ayuda a que un conjunto de drones se comporte como una bandada de aves. IyC

PARA SABER MÁS

Interactions between mechanics and differential geometry in the 19th century. Jesper Lützen en *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 49, págs. 1-72, marzo de 1995.

Convergence of time-stepping method for initial and boundary-value frictional compliant contact problems. Jong-Shi Pang, Vijay Kumar y Peng Song en *SIAM Journal on Numerical Analysis*, vol. 43, págs. 2200-2226, 2005.

Exponential stability of an attitude tracking control system on SO(3) for large-angle rotational maneuvers. Taeyoung Lee en *Systems & Control Letters*, vol. 61, págs. 231-237, enero de 2012.

Euler, reader of Newton: Mechanics and algebraic analysis. Sébastien Maronne y Marco Panza en *Advances in Historical Studies*, vol. 3, págs. 12-21, febrero de 2014.

Una historia breve de la mecánica geométrica. Manuel de León Rodríguez. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2017.

Design of the high-payload flapping wing robot E-Flap. Raphael Zufferey et al. en *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, págs. 3097-3104, abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Leibniz y el principio de mínima acción. Hartmut Hecht en *IyC*, diciembre de 2016.

Cien años del teorema de Noether. David E. Rowe en *IyC*, diciembre de 2018.

El problema de los tres cuerpos. Richard Montgomery en *IyC*, junio de 2020.





DEFENSA PLANETARIA

¿ESTÁ LA TIERRA PREPARADA PARA EVITAR UN ASTEROIDE?

El accidente de Arecibo acabó con el mayor radar del planeta para estudiar objetos peligrosos. ¿Qué ocurrirá ahora?

Sarah Scoles

LA VEGETACIÓN asoma a través de las grietas que recorren la antena del radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico. Tras permanecer operativo durante casi 60 años, el que durante décadas fuera el mayor telescopio del mundo acabó destruido el pasado mes de diciembre por un desafortunado accidente.

Sarah Scoles es periodista científica. Colabora con *WIRED Science* y *Popular Science* y es autora de los libros *Making contact: Jill Tarter and the search for extraterrestrial intelligence* (Pegasus, 2017) y *They are already here: UFO culture and why we see saucers* (Pegasus, 2020).



EN LOS PRIMEROS SEGUNDOS DEL VÍDEO QUE SE GRABÓ EL 1 DE DICIEMBRE DE 2020 EN el radiotelescopio de Arecibo, todo parecía normal. Es cierto que algunos cables de soporte se habían roto en agosto y noviembre de ese año y que ello había dañado la antena de 300 metros de diámetro. Y también que la Fundación Nacional de Ciencias de EE.UU. ya tenía previsto desmantelar Arecibo, un instrumento que comenzó a explorar el cielo en 1963. Así que las cosas no iban demasiado bien para el telescopio, pero al menos seguía ahí.

Eso cambió poco antes de las ocho de la mañana de ese día, cuando, como si alguien hubiera dado una orden, uno de los pilares de apoyo expulsó un poco de polvo. Era un cable que empezaba a romperse. Sobrecargados, otros cables comenzaron también a partirse. La enorme plataforma de instrumentos que pendía sobre el observatorio en forma de cuenco comenzó a inclinarse y, tras un agónico balanceo hacia abajo, se estrelló. Se quebraron más cables y los escombros salieron volando como en una demolición. Al final de la grabación podían distinguirse enormes agujeros en el icónico telescopio y había polvo por todas partes. Arecibo, al menos tal y como lo conocían los científicos, había desaparecido.

Cuando Edgard Rivera-Valentín, del Instituto Lunar y Planetario de Houston y exmiembro del grupo de radar planetario de Arecibo, hizo clic en el vídeo, solo pudo aguantarlo unos segundos. Tardó varios días en ver los dos minutos completos. «Cuando todo se vino abajo, fue... yo empleo la palabra "tragedia"», se lamenta Rivera-Valentín, natural de Puerto Rico, la isla donde se alojaba el observatorio.

Arecibo deja un extenso e ilustre legado de descubrimientos científicos relacionados con el estudio de la meteorología espacial, la búsqueda de vida extraterrestre, el cronometraje de púlsares y el cartografiado del gas de hidrógeno neutro. Pero también poseía un reclamo único: era el sistema de radar planetario más potente, sensible y activo del mundo. Podía escudriñar a través de la espesa atmósfera de Venus y explorar la polvorienta superficie marciana, pero también ayudaba a proteger la Tierra de los asteroides. Sus datos mostraban esas rocas en detalle, revelaban si podían representar una amenaza y ayudaban a esclarecer cómo habría que actuar en caso de que una se dirigiera hacia nosotros. «Una de las cosas geniales de trabajar con un radar es que estás defendiendo activamente el planeta entero», afirma Rivera-Valentín. «Si alguien te pregunta: "¿Por qué debería importarme?", puedes responder: "Voy a asegurarme de que ese asteroide no venga a por ti".»

Las operaciones de radar de Arecibo se enmarcaban en el ámbito de la «defensa planetaria»: el intento de identificar y prevenir posibles colisiones de asteroides y cometas contra este planeta que, a ser posible, nos gustaría conservar intacto.

En un día cualquiera, es poco probable que una roca espacial impacte de forma devastadora contra la Tierra. Pero las consecuencias de una catástrofe semejante serían serías. Y la historia del sistema solar, que incluye mundos salpicados de cráteres, impactos recientes de cometas en otros planetas o enormes objetos que atraviesan la atmósfera de la Tierra y son registrados por las cámaras de seguridad de los automóviles, demuestra una verdad estadística: los sucesos que son improbables en un día cualquiera acaban ocurriendo si dejamos pasar el número suficiente de días. Ese es el motivo por el que la NASA dispone de toda una sección dedicada al problema, por el que numerosas instalaciones astronómicas recopilan datos preventivos, y por el que una inminente misión espacial demostrará qué podríamos hacer los terrícolas si una roca espacial llamase a nuestra puerta.

Pero ¿es suficiente? Con Arecibo y su radar fuera de servicio, el arsenal de defensa planetaria se queda corto. Ahora, la comunidad internacional está tratando de evaluar el riesgo, idear nuevas formas de anticiparse a la amenaza y elaborar planes para lo que podría ocurrir a continuación.

RECUENTO DE ROCAS ESPACIALES

La defensa planetaria ha sido objeto de muchas burlas. A fin de cuentas, los asteroides apocalípticos parecen más propios de las películas que de la ciencia seria. Pero las autoridades empezaron a prestarle más atención cuando, en 1994, el cometa Shoemaker-Levy se dirigió directo hacia Júpiter. Linda Billings, asesora de comunicación de la NASA en materia de defensa planetaria, recuerda el momento en que se produjo el choque. El 21 de julio de 1994, unos días después de una serie de impactos, acudió a una jornada de puertas abiertas en el Observatorio Naval

EN SÍNTESIS

En diciembre de 2020, un accidente destruyó el histórico radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico. La instalación era el sistema de radar planetario más potente, sensible y activo del mundo para estudiar asteroides cercanos.

Aunque el impacto de un asteroide peligroso se considera muy poco probable, en caso de que ocurriera las consecuencias serían graves. Para muchos expertos, la prevención del problema no recibe la atención y la financiación que merece.

La comunidad internacional intenta ahora poner en marcha nuevos proyectos de rastreo y mitigación del riesgo. En los próximos meses, la misión DART, de la NASA, llevará a cabo el primer intento de modificar la órbita de un asteroide cercano.

PÁGINAS ANTERIORES: CAVAN IMAGES, ALAMY STOCK PHOTO



LA MAÑANA DEL 15 DE FEBRERO DE 2013, un asteroide del tamaño de una casa atravesó la atmósfera terrestre y explotó sobre la región rusa de Cheliábinsk. El suceso fue un recordatorio del peligro potencial que suponen las rocas espaciales.

ALEX ALISHEVSKIKH (HTTPS://PHOTOS.CYBERBOREAN.ORG/FEATURED/2013-CHELYABINSK-METEOR-TRAIL)

de Washington D.C., donde los interesados podían echarle un vistazo a Júpiter. En la explanada exterior, los astrónomos aficionados apuntaban sus instrumentos hacia el planeta herido. La gravedad de Júpiter había destrozado el cometa en pedazos y estos se precipitaron sobre la turbulenta atmósfera del gigante gaseoso. Se calentaron a 40.000 grados Celsius y lanzaron al espacio columnas de material de 3000 kilómetros de altura. «Fue una prueba concluyente de que sí que se producen impactos», señala Billings sin aspavientos.

Poco después, los responsables de la Fuerza Aérea de EE.UU. publicaron dos informes, *SpaceCast 2020* y *Air Force 2025*, sobre lo que podía o debía hacer el Ejército para paliar la amenaza de los asteroides en las décadas venideras. De repente, los impactos espaciales se habían convertido en un problema de seguridad nacional. El primer informe, que examinaba cómo mantener la preeminencia de EE.UU. en el espacio, acuñó el término «defensa planetaria». El segundo tenía más o menos el mismo objetivo y ambos consideraron el problema que planteaba la detección de asteroides y la mitigación del riesgo de impacto; es decir, qué habría que hacer para desbaratar una amenaza en caso de que surgiera. Por ejemplo, cabría intentar desviar un asteroide golpeándolo con una nave espacial o detonando un arma nuclear en sus proximidades.

Por aquel entonces, algunos científicos que ahora destacan por su trabajo en el área de la protección planetaria formaban parte de la Fuerza Aérea de Estados Unidos. Tal es el caso de Lindley Johnson, actual responsable de la Oficina de Coordinación de Defensa Planetaria de la NASA y autor de la parte relevante del informe *SpaceCast*; o Pete Worden, exdirector del Centro de Investigación Ames de la NASA. Ellos y sus compañeros advirtieron del riesgo de que la civilización se convirtiera en un cráter. Pero, especialmente tras los atentados del 11 de septiembre de 2001, la cuestión dejó de recibir la atención que muchos habrían querido. Johnson se retiró del servicio activo en 2003. «La NASA me dijo: “Ven a vernos, tenemos un trabajo para ti”», recuerda. Uno de sus cometidos era liderar el programa de Observación de Objetos Cercanos a la Tierra. Hoy, en gran medida gracias a su labor, ese programa se ha transformado en la oficina que él mismo dirige. «Con toda franqueza, un impacto imprevisto sería la mayor catástrofe natural que hayamos presenciado nunca», alerta. Su equipo espera lograr que cualquier posible impacto sea evitable.

A tal efecto desarrollan programas para recabar datos sobre asteroides, basados en parte en telescopios ópticos e infrarrojos de campo amplio que puedan vigilar una región extensa del firmamento. Los observatorios de las universidades de Arizona y Hawái han colaborado con la oficina de Johnson para transformar sus telescopios en centinelas. El grupo también reconvirtió el telescopio espacial Explorador Infrarrojo de Campo Amplio, o WISE, en NEOWISE, o WISE para Objetos Cercanos a la Tierra (NEO, por sus siglas en inglés). El instrumento acaba de concluir su decimocuarto catálogo de todo el cielo y ya está trabajando en el decimoquinto.

Entretanto, los programas informáticos desarrollados por el proyecto Investigación de Asteroides Cercanos a la Tierra de Lincoln (LINEAR), en el Laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts, están actualmente instalados en el Telescopio de Vigilancia Espacial, una instalación de la Fuerza Aérea de EE.UU. ubicada en Australia. Eso ha convertido el observatorio militar en el instrumento de búsqueda de asteroides más productivo del mundo, según algunos indicadores: ha descubierto 142 cuerpos cercanos a la Tierra, 4 objetos potencialmente peligrosos y 8 nuevos cometas.

Con todo, el mandato oficial es identificar el 90 por ciento de todos los objetos que midan 140 metros o más, el tamaño a partir del cual un impacto produciría «un panorama bastante negro en cualquier lugar», según Johnson. Se estima que hay unos 25.000 objetos de ese tipo. «Vamos avanzando, y quizá para finales de año hayamos encontrado 10.000 de ellos», prosigue. Eso supone un 40 por ciento del total tras veinte años de trabajo. En conjunto, los científicos han descubierto más de 25.000 asteroides cercanos a la Tierra de cualquier tamaño, y unos 19.000 de los que han sido captados por cámaras miden más de 30 metros.

UN SUSTITUTO PARA ARECIBO

En la actualidad, más de 30 organizaciones espaciales de todo el mundo participan en la Red Internacional de Alerta de Asteroides (IAWN), integrada por agencias espaciales nacionales, observatorios individuales y astrónomos aficionados. El grupo, formado por recomendación de las Naciones Unidas, coordina diversas operaciones de observación y respuesta. Desde 2016 ha registrado más de 300 aproximaciones cercanas, aquellas en las que se prevé que el asteroide pase a menos de una distancia lunar (la distancia media entre la Tierra y la Luna) del centro del planeta. También ha organizado tres campañas para practicar «los recursos de observación y caracterización que podrían aplicarse a un objeto cercano a la Tierra en un tiempo razonablemente corto».

Esto resulta útil porque el trabajo no acaba con el hallazgo de un asteroide próximo. Los telescopios terrestres ópticos e infrarrojos llevan a cabo observaciones de seguimiento para recabar información sobre los objetos, más allá de certificar que existen. Y los radares planetarios suelen contribuir a precisar las órbitas de los asteroides recién descubiertos y a pronosticar sus trayectorias futuras; es decir, a determinar a dónde irán en los años venideros y si podrían cruzarse con la Tierra. Asimismo, ayudan a discernir la forma y la composición de las rocas.

Las observaciones de radar como las que efectuaba Arecibo se basan en el envío de potentes ondas de radio hacia el objeto. Esas ondas rebotan y se ven alteradas por la rotación, la traslación, la forma y el tamaño del asteroide, así como por los satélites que pueda tener. Además, el tiempo que tardan en regresar revela a qué distancia de la Tierra se encuentra el objeto. Con toda esa información, es posible refinar el cálculo de su órbita, predecir hacia dónde irá y si podría colisionar o no contra la Tierra. También pueden determinarse sus propiedades, lo cual reviste gran utilidad si hay que desviarlo. ¿Es denso o poroso? ¿Redondo o con forma de cacahuete? «Si el eco que retorna presenta cualquier diferencia con respecto a la señal que habíamos transmitido, sabemos que se debe a las propiedades del blanco; en este caso, del asteroide», indica Patrick Taylor, científico del Instituto Lunar y Planetario de Houston y exjefe de grupo en el programa de radar de Arecibo.

Llevar a cabo una observación de radar es como hacer una foto del asteroide desde la seguridad de la superficie terrestre. «Es semejante al sobrevuelo de una nave espacial, solo que con una fracción mínima del coste», explica Ellen Howell, de la Universidad de Arizona. «Obtenemos imágenes que nos muestran rocas individuales, no solo puntos de luz.» Y eso es importante porque, como gustan de decir los planetólogos, «si has visto un asteroide, has visto un asteroide». Howell lamenta que, con la pérdida de Arecibo, esa capacidad se ha visto muy reducida. La facultad de observar el presente, predecir el futuro y luego cambiarlo es lo que podría distinguirnos de nuestros antepasados, a quienes no les quedaba otra que encajar cualquier golpe que les asestara el cosmos. «Los dinosaurios no tenían un programa espacial», bromea Rivera-Valentín, «pero nosotros sí».

Arecibo no era el único radar planetario de Estados Unidos. Aún queda otro, el Radar del Sistema Solar de Goldstone, en California, pero este solo puede detectar menos de la mitad de los asteroides cercanos a la Tierra que identificaba Arecibo. E incluso si Goldstone fuera el instrumento perfecto, siempre puede haber incidentes o quedar fuera de servicio, como ocurrió durante unos 18 meses por mantenimiento justo antes de que Arecibo se derrumbara. «Perder Arecibo forzará a la gente a pensar cuál debería ser el siguiente paso», opina Taylor. «Yo no lo tengo claro.»

Al respecto, los científicos cuentan con varias ideas. Hay quien defiende construir un «Arecibo 2.0» combinando varias antenas de menor tamaño en el mismo lugar de la isla para que operen juntas como una única antena mayor, lo que permitiría recuperar la capacidad de radar. En el Observatorio de Green Bank, en Virginia Occidental, los científicos acaban de hacer una prueba con el contratista de defensa Raytheon: enviaron una señal de radar a la Luna y detectaron la onda reflejada con las antenas de la Red de Muy Larga Base, repartidas por todo el país y controladas desde Nuevo México. Esperan que eso siente las bases para una configuración más potente que permita estudiar asteroides. «La propuesta de mejora del Observatorio de Green Bank me parece fantástica», valora Billings, «pero aún no ha recibido financiación».

Aunque la recibiera, el investigador de la Universidad de Arizona Michael Nolan duda que el Observatorio de Green Bank pudiese alcanzar las prestaciones de Arecibo. Transmitir una señal desde un lugar y captarla en otro comporta manejar grandes cantidades de datos, y realizar ambas tareas desde Green Bank adolece de sus propios problemas. «No creo que ninguna de las propuestas que he visto hasta ahora vaya a convertirse en nuestro buque insignia», valora Nolan. El hipotético sustituto de Arecibo tampoco cuenta con financiación.

Por otro lado, la pregunta de qué hacer solo representa el primer obstáculo. También está el problema más general de quién debería hacerlo. Algunos expertos defienden que se trata de una carga demasiado pesada para que recaiga exclusivamente en la comunidad científica. Tal vez, señalan, debería asumirla alguna organización con amplia experiencia en la planificación a largo plazo y, lo que es más importante, con una financiación estable.

FRENAR ASTEROIDES

La Fuerza Espacial es una nueva sección del Ejército de EE.UU. que se ocupa sobre todo de los satélites, así como de su protección y seguridad. Su objetivo consiste en rastrear objetos grandes y pequeños entre la Tierra y la Luna a medida que aumenta la actividad internacional y comercial: satélites, naves espaciales, sistemas de fabricación en órbita y viajes de pago. Ese esfuerzo general se denomina conocimiento del medio espacial y suele llevarse a cabo con instrumentos ópticos y radares de largo alcance. Pero, mientras un radar vigila la actividad en órbita, podría también detectar asteroides que surcaran el espacio en la misma dirección (aunque, esperemos, mucho más lejos). Los responsables de la NASA y de la Fuerza Espacial han hablado sobre la posibilidad de colaborar en un sistema de este tipo, con el que todos saldrían ganando. «No ha sido solo una tormenta de ideas, pero todavía no nos hemos decantado por un concepto concreto», revela Johnson, quien recalca que las conversaciones siguen su curso. En 2020, las dos organizaciones firmaron un memorando de entendimiento en el que se comprometían a trabajar juntas en determinados asuntos, como la defensa planetaria y el conocimiento del medio espacial.

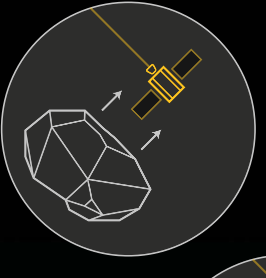
Algunos, sin embargo, quieren aumentar la participación militar. A Peter Garretson, miembro del Consejo Estadounidense de Política Exterior y exdirector del Grupo de Trabajo para la Investigación de los Horizontes del Espacio de la Universidad del Aire, en Alabama, le gustaría que los militares dirigieran las operaciones de defensa planetaria, en particular las de mitigación del riesgo de impacto. «La NASA es sobre todo una agencia científica y de exploración. En mi opinión, esta es claramente

Cómo desviar un asteroide

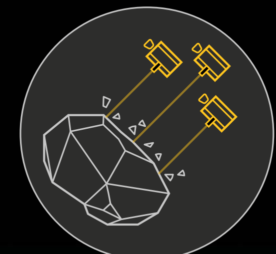
¿Qué ocurriría si los astrónomos descubrieran que una gran roca espacial se dirige hacia la Tierra? Aunque habría varias opciones para desviarla, hasta ahora ninguna de ellas se ha puesto a prueba. Algunas, como el uso de armas nucleares, conllevan sus propios riesgos, ya que los restos de la explosión aún podrían alcanzar nuestro planeta.

POSIBLES MÉTODOS DE DESVÍO

Hacer volar una nave espacial muy masiva cerca del asteroide para que actúe como «tractor gravitatorio» y altere la órbita de la roca.



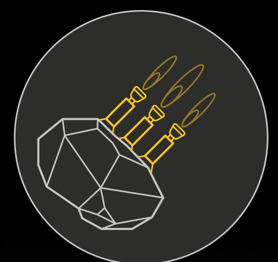
Disparar láseres desde pequeñas naves espaciales para vaporizar su material, el cual saldría despedido de la superficie y crearía un empuje en sentido opuesto.

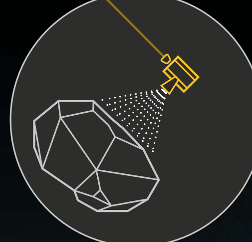


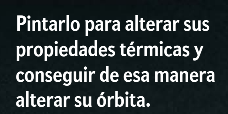
Usar un espejo para redirigir la luz solar y lograr que la roca desprenda material, lo que le proporcionaría un impulso.



Si el asteroide es lo bastante sólido, enviar a la superficie el equipo necesario para propulsarlo con cohetes.







Pintarlo para alterar sus propiedades térmicas y conseguir de esa manera alterar su órbita.



Detonar un arma nuclear cerca del objeto para transferirle energía y variar su rumbo.



Golpear el asteroide con una nave espacial antes de que choque contra la Tierra. Los científicos esperan probar este método con la misión DART.

PRUEBA DE REDIRECCIÓN DE UN ASTEROIDE DOBLE (DART)

La misión DART, que despegará a finales de 2021 o principios de 2022, pretende lanzar una nave contra Dimorphos, la pequeña luna del asteroide Didymos. El impacto debería modificar la velocidad del satélite y provocar un cambio observable en su órbita alrededor de Didymos.



FUENTE: NASA, LABORATORIO DE FÍSICA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS (*datos de DART*); MATTHEW TWOMBLY (*ilustración*)



LA PRUEBA DE REDIRECCIÓN de un Asteroide Doble (DART), cuyo lanzamiento está previsto para este año o el próximo, será la primera que intente alterar la trayectoria de una roca espacial estrellando una nave contra ella (*recreación artística*).

NASA, LABORATORIO DE FÍSICA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS

una misión de defensa», sostiene Garretson. «No vamos a desviar un asteroide por motivos científicos.»

En realidad, no hay ninguna institución con el cometido específico de desviar asteroides. Una de las agencias implicadas es el Departamento de Energía de EE.UU., el mismo organismo que se encarga de desarrollar las armas nucleares del país. En el Laboratorio Nacional de Los Álamos, Cathy Plesko investiga la mitigación del riesgo de impacto. Se introdujo en el campo de la defensa planetaria al estudiar los cráteres de impacto de Marte por medio de modelos informáticos. «¿Cómo prevenir la formación de un cráter?», recuerda que se preguntaba. Un día, un astrofísico veterano del laboratorio le dijo que, en su opinión, el mismo tipo de código que ella usaba para modelizar los cráteres podía servir para la mitigación del riesgo: mostraría la reacción de un asteroide cuando algo chocara contra él, en vez de cuando él chocara contra algo. Justamente la prevención que ella tenía en mente.

Plesko comenzó a estudiar el problema, pero el laboratorio no se implicó demasiado. Eso cambió en febrero de 2013, cuando un asteroide de 20 metros de diámetro atravesó la atmósfera y explotó a unos 30 kilómetros de altura sobre la región rusa de Cheliábinsk. El estallido liberó una energía de unos 450 kilotones e hirió a 1600 personas. Al igual que pasó con el cometa Shoemaker-Levy, el evento hizo que muchos abrieran los ojos. El equipo de Plesko se puso manos a la obra y, junto con la NASA, empezó a tratar de entender qué problemas físicos necesitaban solucionar si llegaba algo más grande y peligroso. Eso pasa por descubrir de qué se componen los asteroides, un problema sorprendentemente difícil para el que, desde la Tierra, el radar representa la mejor solución. «¿Son montones de escombros? ¿Una especie de bolas de barro? ¿O son pedazos de hierro?», se pregunta Plesko. Hay una gran variedad, y eso complica las simulaciones. Si modelizamos un avión en un ordenador, conocemos con precisión su densidad y su forma. «Pero, en el caso de los asteroides y los cometas, no disponemos de esos datos», señala. «Es algo que tenemos que averiguar.»

Hoy, Plesko examina las distintas posibilidades que existen para alejar del planeta diferentes tipos de asteroides. Al menos en principio, una opción sería el denominado «tractor gravitatorio»: lograr que una nave espacial de gran masa vuele lo más cerca posible del asteroide. «Una nave así podría atraer al asteroide o cometa hasta sacarlo de su trayectoria original», apunta Plesko. Sin embargo, la experta calcula que la tecnología necesaria para conseguirlo tardará décadas.

Algunos científicos han contemplado usar láseres acoplados a pequeñas naves espaciales para calentar el material del asteroide, vaporizarlo y expulsarlo de la superficie. Dado que a cada acción le corresponde una reacción igual y opuesta, eso impulsaría el asteroide en sentido contrario. Algo más expeditivo sería golpear un asteroide con una nave espacial antes de que se estrellase contra la Tierra. Otras alternativas incluyen orientar un espejo para que concentre los rayos solares sobre el asteroide hasta que desprenda material, moverlo con cohetes o incluso pintarlo para cambiar sus propiedades térmicas y con ello su órbita.

Al trabajar en el Departamento de Energía, Plesko también estudia la opción más agresiva de todas: una «explosión nuclear cercana». Este método consiste en detonar un arma nuclear a poca distancia de un objeto próximo a la Tierra. Eso desviaría la roca igual que las otras técnicas, solo que de una forma más enfática. Sin embargo, varios expertos han sugerido que la roca podría romperse en trozos más pequeños que también supondrían un peligro. En cualquier caso, esta opción se complica bastante dada la naturaleza de las bombas nucleares y la prohibición internacional de enviar al espacio armas de destrucción masiva. Un país podría alegar que se está preparando contra los

asteroides como excusa para la proliferación nuclear. Además, un asteroide constituye una amenaza global, pero una única nación estaría empleando su arsenal para combatirlo. «Nadie se toma eso a la ligera», asegura Plesko.

Cada dos años, la comunidad internacional escenifica una especie de juego de rol al estilo de *Dragones y mazmorras* en el que las agencias simulan su respuesta a una situación ficticia de defensa planetaria. Los datos sobre el escenario del impacto se publican en línea con antelación, y cada día se va desvelando más información sobre el suceso. En 2019, antes de llegar a la conferencia del evento, los participantes sabían que una roca de entre 100 y 300 metros de diámetro tenía una probabilidad del 1 por ciento de chocar contra la Tierra ocho años más tarde. Al tercer día, sabían que medía 260 metros de largo y 140 de ancho y que se dirigía hacia Denver.

Mientras el grupo diseñaba una misión para desviar el objeto, un fragmento de 60 metros de ancho se desprendió y puso rumbo a Manhattan. Los jugadores pasaron al modo de gestión de catástrofes y comenzaron a estudiar cómo evacuar a la población, qué hacer con las plantas químicas y las centrales nucleares, y cuáles serían las consecuencias económicas. Este año, los participantes regresaron al tablero de juego (por videoconferencia) para investigar un asteroide que podría llegar en tan solo seis meses. Ese ejercicio «permite tomar conciencia del tiempo que se tarda en hacer las cosas», afirma Plesko. No es como en Hollywood, añade, donde todo es más del estilo de: «¡Hemos descubierto un asteroide, lancemos el artefacto!». Aun así, responder de forma eficaz está al alcance de la humanidad, aunque sea más despacio que en la gran pantalla.

EL PRIMER ENSAYO

Dentro de poco, una audaz misión pondrá a prueba la capacidad de la ciencia para mover montañas en el espacio. La Prueba de Redirección de un Asteroide Doble (DART, por sus siglas en inglés), planeada por la NASA y cuyo lanzamiento está previsto para finales de 2021 o principios de 2022, pretende demostrar por primera vez que es posible cambiar el rumbo de uno de estos objetos. Andrew Rivkin, investigador de la Universidad Johns Hopkins y uno de los líderes del equipo de investigación, empezó a estudiar los asteroides atraído por la ciencia que esconden estos objetos y por el origen del sistema solar. «Da igual qué respuesta busquemos; de algún modo, todo se reduce siempre a los asteroides», asegura.

DART viajará a un sistema binario formado por un gran asteroide, Didymos, y una pequeña luna llamada Dimorphos. A continuación, la nave espacial chocará contra la luna, con lo que cambiará su órbita alrededor de su hermano mayor y, en consecuencia, el movimiento de este alrededor del Sol. La nave, de 610 kilos, golpeará a la «pequeña» Dimorphos, de 4800 millones de kilos, a una velocidad de 6,58 kilómetros por segundo. Los expertos calculan que eso cambiará el período orbital de la luna en unos 10 minutos. Dado que Dimorphos ya tiene un tamaño como para poner en peligro a una ciudad, los científicos esperan comprobar hasta qué punto pueden transferir el momento de una nave a una roca espacial. Se trata de una opción de mitigación de magnitud intermedia, a medio camino entre «lanzarle una bomba atómica» y «esconderse en el sótano», en palabras de Rivkin. La técnica general también funcionaría en sistemas con un solo asteroide, ya que es posible estrellar una nave contra una roca aislada. Sin embargo, los científicos tienen una buena razón para elegir un sistema doble: resultará mucho más sencillo determinar cuánto ha cambiado la órbita de una luna, ya que bastará con observar cómo esta pasa por delante su compañero en tiempo real.

Los científicos verán por primera vez el sistema (reducido a un solo píxel) en 2022, aproximadamente un mes antes de la colisión. «Trataremos de guiar [la nave] hacia ese único píxel», señala Elena Adams, también de la Universidad Johns Hopkins e ingeniera de sistemas de la misión. Una hora antes de llegar allí, vislumbrarán la luna y comenzarán a dirigirse hacia ella. «Y entonces, pum: perderemos el contacto», prosigue la experta. Eso será una buena noticia, porque significará que se ha producido el impacto. «Te pagan por eso», bromea Adams, «para destruir una nave espacial de 250 millones de dólares».

El equipo confía en que el radar de Goldstone y los telescopios espaciales contemplen el espectáculo. «Esperábamos que Arecibo lo viera», se lamenta Rivkin. Los datos recogidos durante el evento y después de él se incorporarán a los modelos con los que Plesko y otros científicos intentan determinar cómo responder a una amenaza real. (En 2024, está previsto que la Agencia Espacial Europea lance la misión Hera, la cual debería llegar a Didymos en 2026 para evaluar con detalle el asteroide y los efectos causados por DART.) «Los programas como DART constituyen un seguro en caso de que nos encontremos con algo así», apunta Rivkin. En la vida cotidiana, las personas contratamos seguros de incendios e inundaciones. «Esperamos que la casa no se incendie ni se inunde, pero de algún modo estamos haciendo lo correcto», ejemplifica.

Aunque Rivkin se alegra de que la gente ya no se tome a broma la defensa planetaria y entienda la utilidad de contratar un seguro cósmico, advierte también que las rocas espaciales no deberían generarnos ansiedad. «Si la gente pasa la noche en vela por culpa de los asteroides, espero que sea pensando en la increíble ciencia que hay detrás», añade. De hecho, esa ciencia (cómo detectar, vigilar, predecir y caracterizar estos viajeros solitarios) es la que hace posible la defensa planetaria. Y esta, a su vez, permite que los humanos le podamos arrebatar algo de control al cosmos. «Es la primera vez que, como especie, tenemos la oportunidad de prevenir un desastre natural», subraya Plesko. «No podemos detener un huracán ni evitar los terremotos. No podemos sellar la falla de San Andrés con pegamento.» Pero ¿frenar un asesino de planetas? «Si fuera necesario», concluye, «estoy segura de que seríamos capaces». IyC

PARA SABER MÁS

International Asteroid Warning Network. Página web de la Red Internacional de Alerta de Asteroides. https://iawn.net

Hera: ESA's planetary defence mission. Página web de la Agencia Espacial Europea sobre la misión Hera: www.esa.int/Safety_Security/Hera

Double Asteroid Redirection Test (DART) mission. Página web de la NASA sobre la misión DART. **www.nasa.gov/planetarydefense/dart**

EN NUESTRO ARCHIVO

Asteroides y cometas como amenaza para la Tierra. Andrea Carusi en *IyC*, septiembre de 1995.

El encuentro del cometa Shoemaker-Levy 9 con Júpiter. David H. Levy, Eugene M. Shoemaker y Carolyn S. Shoemaker en *IyC*, octubre de 1995.

El remolcador de asteroides. Russell L. Schweickart, Edward T. Lu, Piet Hut y Clark R. Chapman en *IyC*, enero de 2004.

Siete años de misión para reunir 60 gramos de asteroide. Dante S. Lauretta en *IyC*, septiembre de 2016.

HISTORIA DE LA MEDICINA

La medicina de la Revolución francesa

En 1789, los médicos franceses se ven envueltos en un juego de poder que intenta preservar la salud de la población sin poner en riesgo las nuevas libertades ni la economía de guerra

Jean-Luc Chappey





EL PUERTO DE MARSELLA durante la epidemia de peste de 1720. Pese a que la ciudad fue puesta en cuarentena, la peste causó 50.000 muertos y otros 75.000 en toda la Provenza.

Jean-Luc Chappey es profesor de historia de la ciencia en el Instituto de Historia Moderna y Contemporánea de la Universidad Panteón-Sorbona de París.



MARSELLA, 25 DE MAYO DE 1720. EL NAVÍO *GRAN SAN ANTONIO*, DE UN comerciante de la ciudad, atraca procedente de Esmirna, Líbano y Siria, cargado de algodón y otras mercancías. En menos de un mes, tras varias muertes a bordo y pese a la imposición de una cuarentena, la ciudad comienza a registrar casos de peste. Las autoridades locales adoptan las primeras medidas coercitivas: confinan en sus domicilios a los enfermos y a sus allegados, expulsan a los mendigos foráneos y encierran a los indigentes. El Parlamento de la Provenza, por su parte, prohíbe el comercio con la ciudad y ordena el cierre de sus puertas. A principios de agosto, el Gobierno municipal ordena prender fuegos en las murallas, las calles y las plazas para sanear el aire. La epidemia alcanza su punto álgido en septiembre, con la muerte de más de mil personas al día. Las autoridades obligan a presos y vagabundos a retirar los cadáveres y la basura que se acumulan en las calles, mientras el poder central envía médicos de refuerzo y aísla Marsella y la Provenza del resto del reino. Poco a poco, la epidemia comienza a remitir, pero la ciudad seguirá confinada hasta noviembre de 1721. Tras un rebrote, el puerto aún sufrirá un bloqueo comercial de varios meses en 1722.

La lucha contra las epidemias, ¿justifica la restricción de las libertades individuales y colectivas? La cuestión resurge con fuerza unas décadas más tarde, en 1789, en términos no muy distintos a los que empleamos hoy. Tras proclamarse los principios de la nueva comunidad francesa en la Declaración de los Derechos del Hombre y del Ciudadano, ¿era posible justificar la adopción de medidas que limitaran las libertades individuales en nombre de la defensa de la salud pública? La epidemia de Marsella pudo contenerse gracias a que la monarquía absoluta se apoyaba en herramientas muy restrictivas, como la intervención del ejército, las cuarentenas o el confinamiento y la vigilancia de la población. El poder real contaba, además, con el apoyo de los médicos que, si bien no se ponían de acuerdo sobre las causas y los tratamientos de las enfermedades, consideraban que la intervención del Estado en los asuntos sanitarios era tan legítima como necesaria.

Según el filósofo Michel Foucault, es en esta política sanitaria definida en torno a la noción de higiene pública donde debemos buscar las raíces de la biopolítica, un concepto que hoy sigue despertando debates y controversias. Al erigirse en «educadores» del género humano, los diputados de la Asamblea Nacional Constituyente tuvieron que hallar el modo de encajar las políticas sanitarias en la nueva era de las libertades. Durante el período revolucionario, igual que ocurre hoy con la COVID-19, el temor a

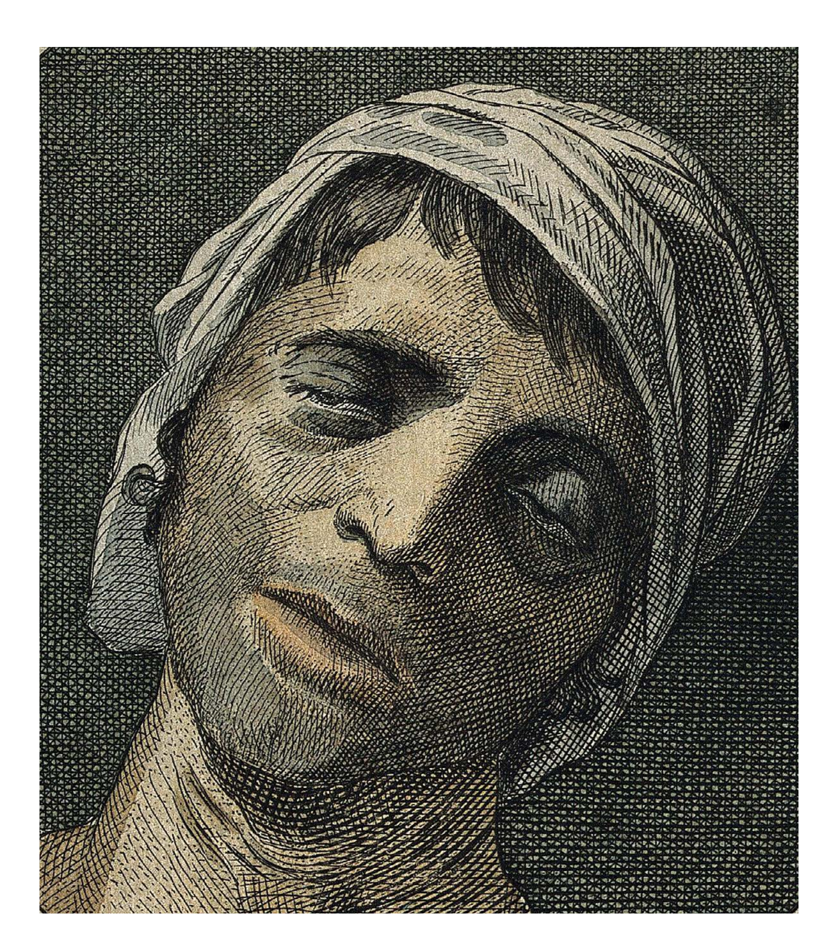
EN SÍNTESIS

Desde 1789, los médicos franceses ganan poder en todo lo relativo a la salud de la población. Las autoridades revolucionarias intentan compaginar las restricciones sanitarias para prevenir epidemias con las nuevas libertades sociales.

Pero las medidas aún son muy coercitivas y están supeditadas a la guerra, que convierte París en un arsenal químico y militar en detrimento de la salud de sus habitantes.

La relación entre epidemias y dinámicas políticas continúa a lo largo del siglo XIX, y el propio Bonaparte obtiene rédito de la enfermedad y burla las restricciones para acceder al poder.

las epidemias y las medidas para combatirlas condicionaron las decisiones políticas y, en general, las formas de gobernar las sociedades. Basándose en los consejos, a veces contradictorios, de los médicos (los «higienistas») y otros expertos, las autoridades políticas que se sucedieron entre 1789 y 1800 debieron mantener un equilibrio precario entre la defensa de los nuevos derechos individuales y colectivos, y las restricciones sanitarias.



JEAN-PAUL MARAT sufría una enfermedad cutánea que sus detractores asociaban a una infamia política.

GRABADO DE J. L. COPIA, BASADO EN UN DIBUJO DE JACQUES LOUIS DAVID (1793). COLECCIÓN WELLCOME (CC BY 4.0)

EL MIEDO A LAS EPIDEMIAS

A partir de 1789, los riesgos de epidemia y de contagio se sitúan en el centro de las dinámicas de crisis y de radicalización política. Pese a que el poder absolutista consiguió acabar con las grandes epidemias de peste que marcaron la Europa del siglo XVIII, el riesgo de contagio sigue muy presente, como demuestra la epidemia de disentería que afecta a casi todas las provincias francesas en 1779. Además, las condiciones sanitarias y la mejora de los servicios médicos aparecen con frecuencia en los cuadernos de quejas que redactan las poblaciones rurales y urbanas en la primavera de 1789.

Por otro lado, las revueltas campesinas que agitan las áreas rurales durante el verano de 1789, conocidas como el Gran Miedo, subrayan la relación entre los temores generados por el nuevo contexto (el miedo a los bandidos a sueldo de los contrarrevolucionarios) y otros recelos más antiguos: en muchas provincias, los levantamientos surgen a partir de sospechas ligadas a la presencia, real o imaginaria, de extranjeros acusados de envenenar las fuentes de agua o hechizar los rebaños. Esos rumores ganan fuerza al ser instrumentalizados y distorsionados por portavoces políticos que se amparan en ellos para estigmatizar a sus adversarios.

En los bancos de la nueva Asamblea Nacional o de los clubs políticos, las nociones de contagio y epidemia se imponen en la retórica revolucionaria: para los revolucionarios, se trata de denunciar todos los excesos, abusos e injusticias a los que achacan las afecciones físicas y morales de los franceses; y sus oponentes consideran que la propia Revolución es una enfermedad propagada por el sesgo de los periódicos y los clubs.

La lucha contra las epidemias, ¿justifica la restricción de las libertades individuales y colectivas?

Con el tiempo, esas metáforas producen sus efectos: en 1792, España establece un «cordón sanitario» en los Pirineos para impedir la circulación de libros y prevenir el contagio de las ideas revolucionarias procedentes de Francia; en 1793, el cuerpo enfermo de Jean-Paul Marat deviene, a ojos de sus enemigos, el signo evidente de una infamia política. Unos meses más tarde, al propio Robespierre le atribuyen diversas dolencias que explicarían su gusto por la violencia, un material que aún hoy alimenta la leyenda negra en torno a su figura. Pocos días antes de su caída política (el 9 de termidor del año II, es decir, el 27 de julio de 1794), un comisario del departamento de París informa a la Convención Nacional de numerosos rumores acerca de una amenaza de peste que se cerniría sobre la ciudad, una señal más de la estrecha relación entre las fases de crisis política y la presencia, confirmada o no, de epidemias.

UNA POLÍTICA SANITARIA REFORZADA

Más allá del discurso, las autoridades revolucionarias recogen el legado de la monarquía absoluta y se preocupan especialmente por la salud de la población: Francia, el reino más poblado de Europa, debe su potencia política, económica y cultural a su vitalidad demográfica, que depende desde principios del siglo XVIII de la mortalidad ligada a pestes y epidemias. A partir de 1789, las autoridades mantienen o incluso refuerzan los distintos dispositivos que conforman la «policía sanitaria» del Antiguo Régimen: vigilancia y puesta en cuarentena de los barcos procedentes de zonas de riesgo del Mediterráneo; control administrativo de la circulación de enfermedades; lucha contra los miasmas y la mala calidad del aire mediante la desecación de pantanos y el traslado de cementerios; y eliminación de toda actividad contaminante, como las carnicerías o curtidurías, en las zonas más pobladas de las grandes ciudades.

Entre 1789 y 1790, los nuevos municipios mantienen esas restricciones para preservar la salud de los ciudadanos que componen la nueva nación «regenerada». Los miembros de

SUITE DU MOIS DE DÉCEMBRE 1779.

OBSERVATIONS.

Vienne, *Autriche.* . .	Le 1[er], tremblement de terre, précédé & ſuivi de froid & de chaleurs extraordinaires pour la ſaiſon.
Saxe.	Le 4, à midi, tempête violente & tonnerre en Saxe.
Bergen, *Comté de Hanaut.*	Le 5, à une heure du ſoir, tremblement de terre.
Portici & Réſina, *Italie.*	Le 12, tremblement de terre.
Piſtoye, *Italie.*	Le 24 & le 31, à ſix heures du ſoir, tremblement de terre.
Alpes du Diſtrict de Lizzanno.	Le 27, neige abondante & vent impétueux.

MALADIES.

Avezac, *Nébouzan.* : :	Rhumes, fluxions de poitrine.
Billon, *Auvergne.* . . .	*Pendant l'automne*, fièvres tierces, continues & intermittentes; dyſſenteries en petit nombre, cours de ventre.
Bordeaux, *Guyenne.* :	Rhumes, catarrhes, maux de gorge.
Bourbonne-les-Bains, *Champagne.* . . .	Dyſſenteries.
Chinon, *Touraine.* . .	Dyſſenteries, catarrhes, coqueluche, fièvres irrégulières, fièvres eruptives, rhumatiſme.
Cuſſet, *Bourbonnois.* .	Fièvres rémittentes, fluxions catarrhales.
Dijon, *Bourgogne.* : .	Fièvres catarrhales, fluxions, fièvres quartes, vertiges.
Les Eſſarts, *Poitou.* .	Dyſſenterie épidémique.
Lille, *Flandres.* . . .	Rhumes épidémiques, fluxions de poitrine, fièvres intermittentes.
Lorette, *Comminge.* . .	Fièvres quartes, fluxions ſur les dents.
Luçon, *Poitou.* . . .	Dyſſenterie meurtrière.
Montauban, *Languedoc.*	Fièvres rémittentes, rougeoles, fluxions de poitrine.
Mont-Morenci, *Ile de France.*	Aucune maladie; quelques morts ſubites.
Mont-Louis, *Rouſſillon.*	Douleurs de côté; fièvres putrides bilieuſes dans les environs.
Obernheim, *Allemagne.*	Fièvres putrides vermineuſes, pleuréſies.
Paris, *Ile de France.* .	Rhumes épidémiques, fièvres catarrhales, affections rhumatiſmales, jauniſſe, éryſipèles.
Poitiers, *Poitou.* : :	Petite-vérole, coqueluche, fièvres continues, ictères, hémorrhagie, maux de gorge aphtheux, fièvres tierces, téneſmes, maux de tête, apoplexies.
St.-Saturnin, *Provence.*	Coqueluche.
Soiſſons, *Ile de France.*	Dyſſenterie, fièvre quarte.
Troyes, *Champagne.* .	Petite-vérole, fièvre putride vermineuſe, coqueluche épidémique, fièvre tierce, fluxion de poitrine.
Vire, *Normandie.* . . .	*Pendant l'automne*, dyſſenterie épidémique, fièvre lente nerveuſe.

A FINALES DEL SIGLO XVIII, la Real Sociedad de Medicina francesa listaba mensualmente las enfermedades y las condiciones meteorológicas observadas en diversas ciudades. Sus miembros creían que ambos factores estaban relacionados.

la Real Sociedad de Medicina (institución creada en 1776, en gran parte, para luchar contra las epidemias) continúan con sus trabajos, en particular sus encuestas en distintas provincias a fin de trazar un mapa sanitario y epidemiológico de la nación. Su secretario general, Félix Vicq d'Azyr, afirma en una sesión celebrada en 1786 que conviene relacionar el (a menudo complejo) origen de las epidemias con los entornos naturales y sociales en los que viven las poblaciones:

La topografía exacta de los lugares, las observaciones meteorológicas, la descripción de las enfermedades en el orden en que aparecen, así como la exposición de sus síntomas, simple y exenta de cualquier sistema o explicación, son los únicos y auténticos medios para alcanzar este conocimiento que anhelamos. Sería útil para nuestro arte que existiera, por así decirlo, un mapa cronológico, universal y metódico de las epidemias, que pondría el origen y desarrollo de cada una de ellas ante los ojos del verdadero médico, le permitiría conocer su causa y tendría como consecuencia tan preciosa como real la seguridad del tratamiento: quizás incluso, instruido sobre el futuro por el conocimiento del pasado, [el médico] podría prevenir los estragos de las epidemias; y la enfermedad, combatida desde su aparición con las armas apropiadas, se extendería menos y sería menos funesta.

En noviembre de 1790, el propio Vicq d'Azyr presenta a los diputados de la Asamblea Constituyente (en cuyo seno existe un Comité de Salud) un gran plan general de reorganización de la medicina francesa. Como tantos otros médicos higienistas de la administración, tanto nacional como local, cree que el período que se abre con la Revolución habrá de permitir reforzar aún más el papel del Estado en la lucha contra las enfermedades y la protección de la salud pública.

Junto a las recomendaciones destinadas a mejorar el funcionamiento institucional de los hospitales y a reformar en profundidad un sistema educativo que juzga totalmente inadecuado, Vicq d'Azyr insiste en el lugar central que médicos, cirujanos, comadronas y veterinarios deben ocupar en la implementación de una verdadera política sanitaria. Todos ellos están llamados a desempeñar una función política y social fundamental: garantizar la salud de la nación. No se trata solo de curar a la población, sino también de prevenir cualquier riesgo susceptible de provocar enfermedades y favorecer su transmisión.

En septiembre de 1791, los miembros de la Asamblea aprueban un decreto que recoge las propuestas de Vicq d'Azyr y

confiere grandes poderes a los médicos en nombre de la lucha contra las enfermedades epidémicas, endémicas y epizoóticas. Como garantes de la salubridad e higiene públicas, intervienen en áreas tan diversas como el urbanismo, el control de las manufacturas y las actividades industriales (sobre todo las químicas) y artesanales, o la supervisión de los circuitos alimentarios, las prisiones y los hospitales. Más en general, se ocupan de todo aquello que tenga que ver de algún modo con la salud de la población: los cementerios, las minas, el alcantarillado, las carnicerías, los mataderos, y los oficios relacionados con animales, minerales o sustancias consideradas tóxicas.

En la Francia revolucionaria, los médicos se convierten así en una pieza clave del engranaje administrativo. Pero en la práctica deben vencer numerosas resistencias. Hay otras lógicas que se oponen a las restricciones médicas, como la de los partidarios de las «libertades» de comercio y emprendimiento, quienes invocan la ley de Allarde (también aprobada en 1791 y que autoriza a cualquiera a ejercer la profesión que desee siempre que obtenga una patente) y se niegan a someter sus actividades a una política sanitaria que juzgan coercitiva.

No era raro que los médicos minimizasen los efectos de la polución

SALUD Y ECONOMÍA DE GUERRA

El estallido de la guerra entre Francia y Austria, en abril de 1792, y la extensión del conflicto en la primavera de 1793 trastocan la política sanitaria. Aun así, preservar la salud de la población y de los animales sigue siendo prioritario para las autoridades revolucionarias. En un momento en el que se torna necesario reclutar, alimentar y equipar al ejército, se trata de evitar las epidemias y las epizootias. En muchos departamentos, los representantes oficiales colaboran con los médicos y veterinarios tomando medidas para luchar contra las epizootias, como aislar o sacrificar a los animales enfermos, o enterrar los cadáveres y el estiércol.

Sin embargo, las medidas sanitarias chocan cada vez más con las limitaciones impuestas por la economía de guerra, indispensables para la supervivencia de la República. Aunque las autoridades proclaman sin cesar la necesidad de proteger la salud de personas y animales, a partir de 1793 el Gobierno revolucionario justifica la eliminación de las medidas coercitivas sobre las que descansaba la política sanitaria desde 1789. Así, autoriza el establecimiento de actividades contaminantes en pleno centro de París, pese al riesgo que suponen para la población circundante.

La concentración de fábricas de armas y equipamiento militar hace de París, arsenal de la República, la capital más contaminada de Europa. A su paso por Notre-Dame, el Sena deviene un auténtico corredor químico lleno de fábricas que consumen grandes cantidades de ácidos, cloro y sosa cáustica, cuya producción y uso están cada vez menos controlados. París se convierte en una ciudad donde las actividades contaminantes cuentan con el apoyo de las autoridades y el aval de ciertos expertos, en particular los químicos. Al evaluar los efectos de la polución, no es raro que los médicos minimicen su importancia y preconicen simples medidas higiénicas que no se corresponden con los riesgos a los que está expuesta la población.

Los testimonios de los viajeros que pasan por París dan cuenta de los efectos tóxicos de la polución. Como escribe el conde italiano Bartolomeo Benincasa en su *Diario de un viajero neutro* de 1796, «podemos decir desde la verdad más absoluta que París está enferma: su mal aspecto, la palidez de los objetos, en todo y por todas partes la apariencia de la desgracia. Esta es al menos la primera impresión que se obtiene al recorrer muchas calles del centro de la ciudad».

En este clima malsano, al que se suma el miedo a una invasión extranjera, cualquier rumor sobre una posible epidemia constituye una amenaza real para las autoridades. ¿No tendrán los «enemigos» la tentación de envenenar a los parisinos? Durante el verano de 1794 se declara una enfermedad sospechosa en el corazón de la Escuela de Marte, creada ese mismo junio para dar una instrucción militar y una educación republicana a 4000 jóvenes voluntarios. Varios periódicos se hacen eco de olores fétidos y ruidos alarmantes, lo que desata el pánico en los barrios vecinos al Campo de Marte. Los miembros de una comisión médica enviada con carácter urgente logran restablecer la calma en pocos días, tras constatar que se trata de una epidemia de disentería. Aislándolos y repartiéndolos en tiendas de campaña, los médicos hacen guardar cama a 1200 alumnos, de los cuales solo fallecen 10. Algunos diputados y expertos no dudan en criticar los efectos de las actividades contaminantes en la salud de la población e insisten en la aparición de nuevas enfermedades vinculadas a la guerra.

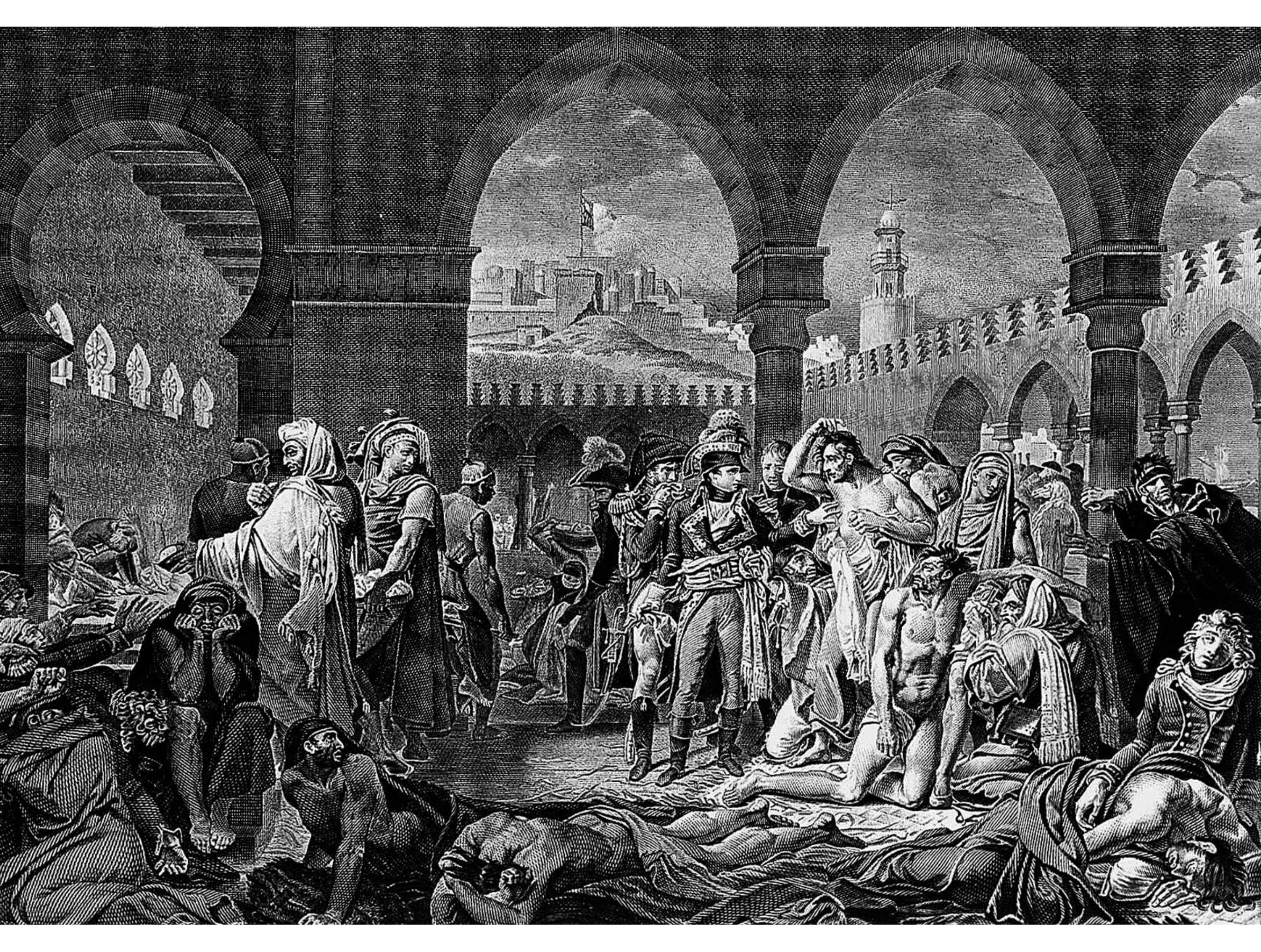
Las autoridades republicanas no abandonan las medidas para prevenir las epidemias, aun si solo atañen a una parte de

MEDICINA MILITAR

La aportación de la medicina italiana

El avance de las tropas republicanas en territorio italiano puso en contacto a los médicos franceses con sus colegas italianos, cuyas investigaciones y prácticas en materia de curas, medicación y organización hospitalaria se tomaban como modelo en toda Europa. En las últimas décadas del siglo XVIII, muchos médicos reformistas italianos (como el napolitano Antonio Savaresi, que más tarde participaría en la expedición de Egipto y en la de Santo Domingo de 1802) se implicaron en los movimientos patrióticos que cuestionaban los regímenes principescos y aristocráticos de Italia. Eso hizo que algunos acogieran con entusiasmo a los ejércitos franceses. Por su parte, los médicos militares galos se familiarizaron con nuevas técnicas quirúrgicas y aprendieron a usar nuevos medicamentos, como el láudano.

Desde un punto de vista más teórico, la experiencia sobre el terreno italiano (y, en particular, su reseñable gestión de las zonas húmedas) confirmó la importancia concedida a las tesis neohipocráticas, según las cuales hay que buscar el origen de las enfermedades y de sus tratamientos en los entornos (los miasmas) donde viven las poblaciones. También permitió que los franceses tuvieran acceso a los trabajos del médico escocés John Brown (1735-1788), cuyas investigaciones sobre nuevos medicamentos revolucionaron las prácticas terapéuticas en Europa.



VISITA DE NAPOLEÓN BONAPARTE al hospital de apestados de Jaffa, en Palestina, en marzo de 1799. El grabado se basa en un cuadro que pintó por encargo oficial Antoine-Jean Gros en 1804, con motivo de la proclamación del Imperio, y presenta la escena con un aire místico.

la población. Un ejemplo de esto es el decreto aprobado en junio de 1793 por la Convención Nacional, que establece la variolización (inoculación de pus extraído de una persona infectada con viruela) obligatoria para los niños de familias que reciban ayudas públicas. Aunque entran en juego otras motivaciones, el Gobierno esgrime el argumento sanitario para justificar el decreto del 14 de frimario del año II (el 4 de diciembre de 1793) que prevé desecar las lagunas y pantanos de toda la República, culpando a las masas de agua de provocar nieblas, granizadas tardías e incluso plagas de insectos.

Por otro lado, el restablecimiento parcial de las normas contra las actividades contaminantes no satisface a los partidarios de las «libertades», que ejercen presiones sobre la política sanitaria del Directorio. Ante todo, esta debe hacer frente a nuevas restricciones militares. Desde la victoria de Fleurus, en junio de 1794, los ejércitos de Francia cruzan sus fronteras para conquistar nuevos territorios en Bélgica, los Países Bajos, Italia y Egipto. La extensión geográfica de los conflictos hace que aumenten los movimientos de tropas en Europa. Y eso favorece la circulación de enfermedades como la peste bovina, que golpea sobre todo a los departamentos del norte bajo el Directorio.

Como resultado de las conquistas, las autoridades militares y civiles deben afrontar nuevas dolencias que afectan a los soldados. Por suerte, como muestran varios ejemplos en territorio italiano, los contactos entre los médicos franceses y los médicos locales permiten introducir numerosas innovaciones tanto en la organización de los hospitales instalados sobre el terreno como en los tratamientos. Esas experiencias vividas por los médicos militares resultarían especialmente valiosas en la campaña de Egipto, donde tuvieron que enfrentarse a enfermedades como la oftalmia, la disentería o la peste.

BONAPARTE VISITA A LOS APESTADOS

El mito bonapartista se construye en parte en el marco de la epidemia de peste que se desata en Alejandría en diciembre de 1798, y que afecta no solo a la población egipcia, sino también

al ejército francés. En marzo de 1799, mientras los médicos (30 oficiales dirigidos por los cirujanos Dominique Larrey y René-Nicolas Desgenettes) organizan una red hospitalaria y establecen nuevos sistemas para trasladar a los enfermos, Napoleón acude al hospital de apestados de Jaffa. Esa visita contribuye a reforzar la popularidad del joven general entre los soldados y la población francesa, informada a través de eficaces canales de propaganda.

Con su gesto heroico de tocar a los enfermos, ¿no busca Bonaparte atribuirse una parte del poder taumatúrgico de los reyes franceses? Lo cierto es que un año más tarde no dudará en volver ilegalmente a Francia, saltándose las estrictas reglas sanitarias que obligan a la tripulación de todos los barcos procedentes de Oriente Próximo o del norte de África a guardar una cuarentena, destinada a detectar la posible presencia de peste.

En efecto, tras zarpar de Alejandría el 23 de agosto de 1799, Bonaparte y la tripulación de las fragatas *Muiron* y *Carère* desembarcan en Ajaccio el 3 de octubre. Pese a que eso contraviene las normas, las autoridades locales no pueden o no quieren enfrentarse al héroe de Italia y Egipto. La tarde del 8 de octubre, las naves echan anclas en la bahía de San Rafael, dependiente de la localidad de Fréjus. También allí, deslumbrados por el joven general, los consejeros municipales dejan que desembarque. Napoleón, ignorando las reglas sanitarias, regresa de inmediato a París, donde le aguardan las celebraciones de su triunfo.

Se trata sin duda de uno de los primeros golpes de fuerza contra la República, un anuncio del que tendrá lugar el 18 y 19 de brumario del año VIII (el 9 y 10 de noviembre de 1799) y que pondrá fin al Directorio. Sin embargo, Bonaparte no es ni mucho menos indiferente a los riesgos que presentan las epidemias, toda vez que su llegada al poder viene acompañada de rumores sobre un contagio en la capital. Eso vuelve a subrayar los vínculos indisociables que existen entre las cuestiones políticas y las sanitarias.

Durante el invierno de 1799, las autoridades del Directorio, al que le quedan pocas semanas de vida, son alertadas del riesgo de una epidemia «de naturaleza pestilente» que parece afectar al personal sanitario y a los enfermos del hospicio del Norte (el hospital de San Luis) de París. El Directorio se toma la amenaza muy en serio porque la posibilidad, real o supuesta, de un contagio alimenta los rumores y aviva los problemas que aquejan al París revolucionario. El Ministerio del Interior y las autoridades departamentales se apresuran a enviar médicos, pertenecientes a la Comisión de Hospicios Civiles y al Comité Central, con la misión de contener la enfermedad e indagar sobre sus orígenes.

Los médicos enseguida descartan que se trate de una peste. Aunque los primeros contagiados son los sanitarios, la enfermedad ataca sobre todo a los niños, principales víctimas de una «fiebre de naturaleza bastante maligna» que debilita el cuerpo sin causar necesariamente la muerte (de los 140 niños hospitalizados, 110 contraen la dolencia y mueren solo 2). Para el médico parisino F. Ruette, «sería difícil encontrar una enfermedad epidémica más contagiosa y menos funesta».

Lejos de contentarse con investigar el origen de una enfermedad que atribuyen en esencia a la mala calidad del aire, las autoridades políticas se ponen manos a la obra: primero tratan a los pacientes (medicación, sangrías) y luego reorganizan el espacio para mejorar la circulación del aire, eliminar la humedad y alejar los miasmas de los enfermos. En pocas semanas, consiguen extinguir el riesgo de epidemia y reestablecer la calma entre la población de los alrededores.

Bonaparte y sus partidarios contribuyen a ello lanzándose a una vasta empresa: la vacunación contra la viruela siguiendo los nuevos métodos del inglés Edward Jenner. Este rompió con sus predecesores al inocular a los enfermos pus procedente de vacas que habían contraído la viruela bovina, una enfermedad similar a la viruela, pero menos agresiva.

La vacuna se concibe como un medio para conciliar la protección de la salud pública con el imperativo del orden político y el control social de la población. La lucha contra la epidemia ya no depende únicamente de actuaciones sobre el aire, los cursos de agua o el ambiente, sino que requiere también una intervención del poder médico (y estatal) en el interior mismo del cuerpo. Al impedir el contagio y los desórdenes políticos y sociales que entraña, la vacunación contribuirá a «completar la Revolución».

No obstante, a partir de 1802 el poder bonapartista debe atender a un nuevo frente. Para aplacar la insurrección liderada por el general Toussaint Louverture en Santo Domingo, Napoleón envía un cuerpo expedicionario bajo el mando del general Leclerc. Pero los soldados caen víctimas de una epidemia de fiebre amarilla que les impide derrotar a la guerrilla de esclavos y hombres libres de color. Retratados como bárbaros sedientos de la sangre de los soldados franceses, los insurgentes son además acusados de transmitir enfermedades que obligan a los pueblos «civilizados» a defenderse luchando y dando la espalda a los principios republicanos.

En el siglo XIX, la relación entre las epidemias y las dinámicas políticas se mantiene durante las distintas crisis que sacuden a Francia. En concreto, bajo el Segundo Imperio, la epidemia de cólera de 1832 justifica los grandes trabajos urbanísticos realizados en París por el barón Haussmann: la lucha contra los focos de insalubridad que dificultan la circulación del aire sirve como pretexto para luchar también contra la pobreza y los «males sociales». Hoy igual que ayer, la cuestión de las epidemias, sus efectos y las medidas sanitarias que han de adoptarse en el espacio político no debería quedar exclusivamente en manos de un grupo reducido de expertos o profesores de medicina. Si queremos evitar que las crisis sanitarias generen tentaciones autoritarias, hay que someter esos asuntos a un amplio debate público. IyC

PARA SABER MÁS

La médecine révolutionnaire (1789-1799). Jean-Charles Sournia. Payot, 1989.
The physical and the moral: Anthropology, physiology, and philosophical medicine in France, 1750-1850. Elizabeth A. Williams. Cambridge University Press, 1994.
Science and polity in France: The revolutionary and Napoleonic years. Charles Coulston Gillispie. Princeton University Press, 2014.
Colère de Dieu, mémoire des hommes. La peste en Provence 1720-2020. Gilbert Buti. Cerf, 2020.
La révolution des sciences. 1789 ou le sacre des savants. Jean-Luc Chappey. Vuibert, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ciencia en la campaña egipcia de Napoleón. Charles C. Gillispie en *IyC*, noviembre de 1994.
La epidemia de fiebre amarilla de Filadelfia de 1793. Kenneth R. Foster, Mary F. Jenkins y Anna Coxe Toogood en *IyC*, octubre de 1998.
La pandemia de COVID-19 a la luz de la historia de la medicina. María José Báguena Cervellera en *IyC*, junio de 2020.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad de París-Sorbona.



Chupar rueda en el pelotón

Los ciclistas que avanzan en grupo o en fila india se cansan mucho menos que quienes corren solos. La razón se debe a la menor resistencia que opone el aire

Cuando un ciclista se escapa del pelotón y corre en solitario la mayor parte de la etapa, lo normal es que acabe agónico y siendo alcanzado por sus compañeros. Una excepción histórica fue el caso de Albert Bourlon, quien desde 1947 ostenta el récord de la escapada victoriosa más larga del Tour de Francia tras recorrer en solitario nada menos que 253 kilómetros. ¿Acaso rinden menos los ciclistas de hoy?

La física, las simulaciones numéricas y los experimentos con túneles de viento fomentarán nuestra indulgencia. Como veremos a continuación, ir en medio del pelotón o en fila india requiere considerablemente menos esfuerzo que correr en solitario. La causa radica en que, en tales casos, la resistencia aerodinámica que experimentan los corredores es mucho menor.

Todo ciclista aficionado sabe que, incluso en un terreno llano y sin viento, avanzar con rapidez requiere un gran

UNA FUERZA NO TAN SUTIL: Para un ciclista, ir en medio del pelotón exige mucho menos esfuerzo que ir solo a la misma velocidad.

esfuerzo. Más aún si rodamos a una velocidad de 15 metros por segundo, o 54 kilómetros por hora, común en las competiciones de ciclismo profesional. ¿Qué fuerzas se oponen a nuestro movimiento y hacen que este resulte tan difícil?

El enemigo del ciclista solitario

Pasemos por alto el rozamiento de la cadena, los piñones, las bielas y los bujes, así como el que tiene lugar entre las ruedas y el suelo. Todas estas fuerzas suelen ser inferiores a los 2 newtons. Cuando vamos en bicicleta, la resistencia al avance se debe principalmente al arrastre aerodinámico. A 15 metros por segundo, e incluso estando recostados sobre el manillar, dicha fuerza asciende a unos 40 newtons, el equivalente al peso de un objeto de unos 4 kilos.

Sin embargo, esa fuerza sigue siendo relativamente modesta. Entonces ¿por qué cuesta tanto superarla? La razón se debe a lo que podemos denominar un «efecto de palanca inverso». A una velocidad como la considerada, cada vuelta de pedal nos hace avanzar más de 10 metros, lo que supone unas 10 veces la longitud circular que recorre el pie durante un pedaleo (para los entendidos, hemos considerado un desarrollo de 52 × 11, neumáticos de 700 milímetros y un brazo de palanca de pedal de 170 milímetros).

Esto es sin duda positivo, pero tiene un coste: la fuerza ejercida sobre el pedal tendrá que ser unas 10 veces mayor que la resistencia aerodinámica; es decir, de unos 400 newtons de media, o el equivalente al peso de 40 kilos. Se trata de una fuerza enorme, sobre todo teniendo en cuenta que, a la velocidad en cuestión, el ciclista pedalea a un ritmo de 81 revoluciones por minuto. Eso implica que ha de ejercer una potencia de 600 vatios de forma continua: algo casi sobrehumano.

¿De dónde procede la resistencia aerodinámica? Su expresión cuantitativa nos da una idea: resulta proporcional al producto de la densidad del aire por el cuadrado de la velocidad del ciclista y por la superficie frontal (incluida la de la bicicleta) que se opone al flujo de aire. Es como si el ciclista tuviera que empujar y poner en movimiento todo el volumen de aire que atraviesa.

Esa es la razón por la que tantos récords se han batido en el velódromo de Ciudad de México, situado a 2250 metros de altitud. El aire es allí un 20 por ciento menos denso que a nivel del mar, lo que reduce en otro tanto la resistencia aerodinámica. Lo anterior también explica por qué lo primero que debe hacer un ciclista que desee disminuir dicha fuerza es rebajar su área frontal; por ejemplo, agachándose sobre el manillar. Prueba de ello es la posición que adoptan los ciclistas profesionales en las carreras contrarreloj.

El coeficiente de proporcionalidad que entra en la expresión de la resistencia aerodinámica depende de la posición que adopte el ciclista y de la forma de la bicicleta, pero también de los detalles del flujo de aire que los rodea. En los últimos años, las simulaciones numéricas y las pruebas en túneles de viento, en particular las llevadas a cabo por el grupo de Bert Blocken, de la Universidad Técnica de Eindhoven, han ido esclareciendo los pormenores de esos flujos tan complejos. Los resultados muestran que el movimiento del ciclista genera una sobrepresión en el aire situado por delante y una depresión en la parte posterior, dos efectos que tienden a frenarlo.

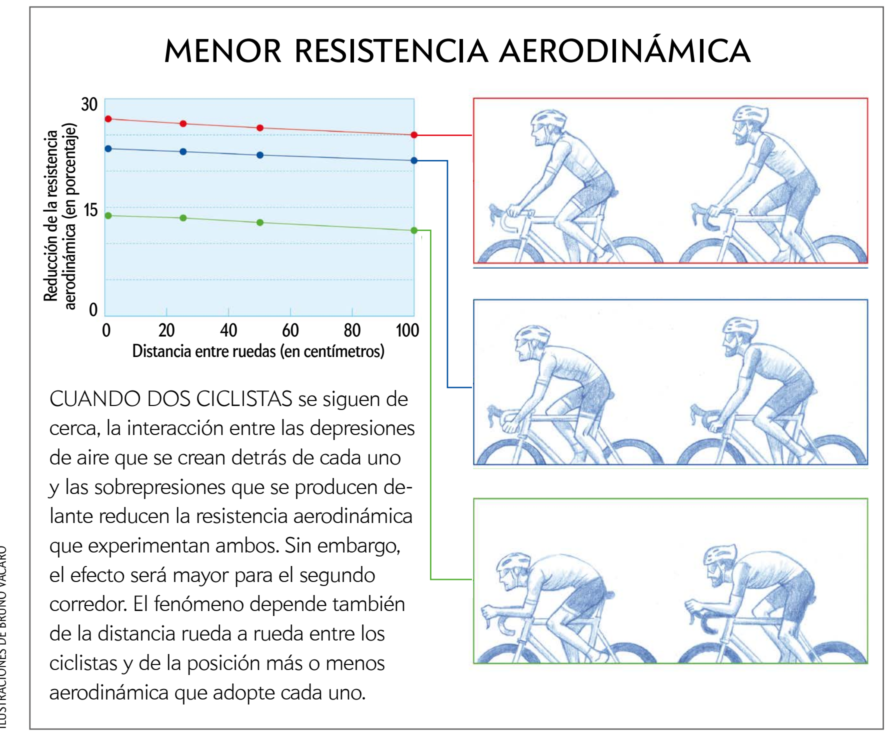
Efecto de succión

La depresión de aire en la parte trasera de un vehículo, o rebufo, es un fenómeno común muy aprovechado en las carreras de coches. Su consecuencia es un efecto de «succión»: cuando un bólido se sitúa detrás de otro, el piloto se beneficia de esa depresión para aumentar la velocidad con la misma potencia de motor. Como consecuencia, podrá adelantar más fácilmente a su rival.

En el ciclismo, cuando un corredor se coloca en la estela de otro para «chupar rueda», el vacío creado tras su predecesor reduce la sobrepresión que él mismo genera. La resistencia aerodinámica disminuye así en más de un 20 por ciento para un ciclista en posición semirrecostada, incluso cuando la distancia rueda a rueda entre las bicicletas asciende a un metro.

Por otro lado, para el ciclista que va en cabeza, la depresión creada tras él se ve reducida por la sobrepresión que genera el corredor que le sigue, lo que rebaja la resistencia aerodinámica que debe superar. Esta ganancia que experimenta el primer ciclista es modesta: del orden del 1,5 por ciento cuando la distancia entre ruedas es de 10 centímetros, la misma que provocaría un coche que lo siguiera a 5 metros. Sin embargo, se trata de un efecto con consecuencias: a 15 metros por segundo, una reducción del 1,5 por ciento en la resistencia aerodinámica permite recorrer 20 kilómetros en 10 segundos menos.

Este efecto implica que, en una contrarreloj, un coche que vaya detrás de un ciclista puede otorgarle una ventaja si lo sigue desde muy cerca. La distancia límite de 10 metros impuesta por la Unión Ciclista Internacional se debe principalmente a razones de seguridad. Sin embargo, garantiza también la equidad de una contrarreloj, ya que, con esa separación, la ventaja que pueda otorgar un coche a un ciclista resulta inapreciable.

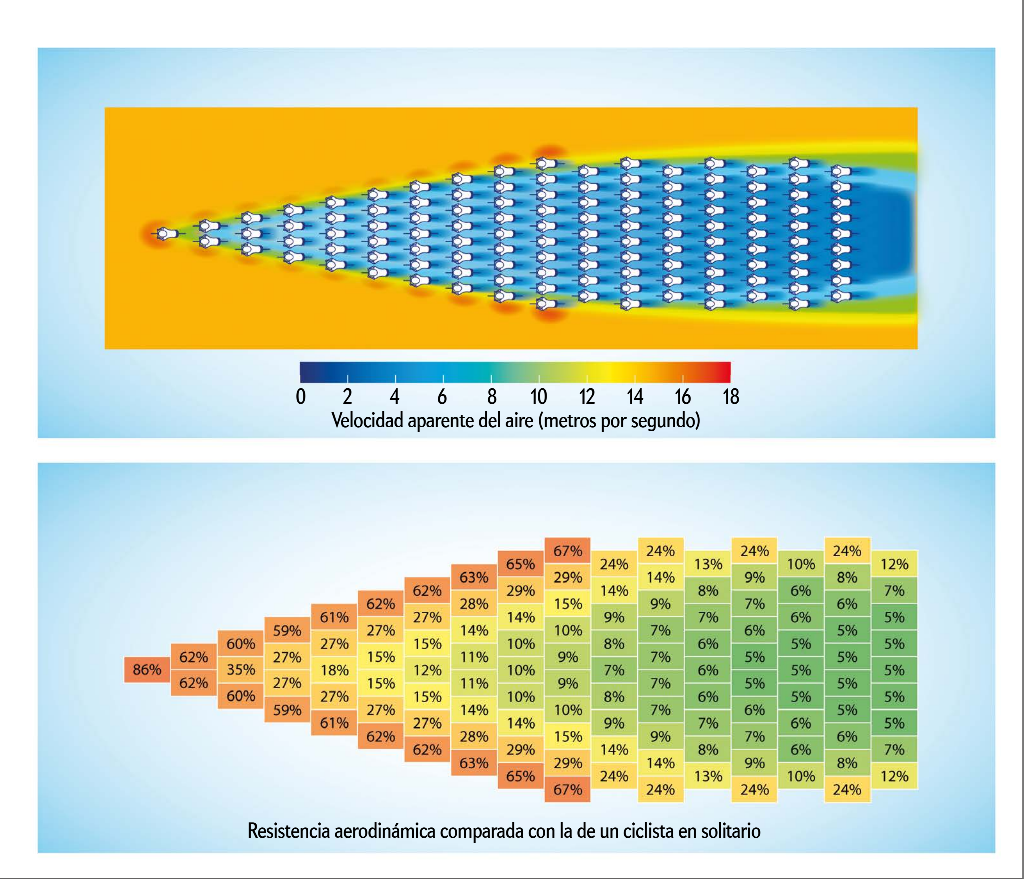


CUANDO DOS CICLISTAS se siguen de cerca, la interacción entre las depresiones de aire que se crean detrás de cada uno y las sobrepresiones que se producen delante reducen la resistencia aerodinámica que experimentan ambos. Sin embargo, el efecto será mayor para el segundo corredor. El fenómeno depende también de la distancia rueda a rueda entre los ciclistas y de la posición más o menos aerodinámica que adopte cada uno.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

UN CENTRO DEL PELOTÓN MUY CONFORTABLE

EL GRUPO DE BERT BLOCKEN, de la Universidad Técnica de Eindhoven, ha efectuado simulaciones numéricas y experimentos con un túnel de viento a escala para analizar la resistencia aerodinámica en un pelotón de 121 ciclistas. Los resultados revelan que los corredores situados en el centro experimentan una reducción considerable en la velocidad aparente del aire (*arriba*) y, por tanto, en la resistencia aerodinámica (*abajo*). Los datos representados aquí hacen referencia a un pelotón denso que avanza a 15 metros por segundo (54 kilómetros por hora).



BRUNO VACARO. FUENTE: «AERODYNAMIC DRAG IN CYCLING PELOTONS: NEW INSIGHTS BY CFD SIMULATION AND WIND TUNNEL TESTING», BERT BLOCKEN ET AL. EN *JOURNAL OF WIND ENGINEERING AND INDUSTRIAL AERODYNAMICS*, VOL. 179, PÁGS. 319-337, AGOSTO DE 2018.

Reducción del 90 por ciento

Consideremos ahora el caso de ocho ciclistas, un número típico en las contrarrelojes por equipos. En tales casos, podemos ver que los corredores van en fila india, y hay una buena razón para ello. Para una distancia entre ruedas de medio metro, la reducción de la resistencia aerodinámica es mayor que en el caso de una pareja de ciclistas: un 37 por ciento para el segundo corredor de la fila y más de un 55 por ciento a partir del cuarto.

Para el grupo en su conjunto, la resistencia disminuye de media en un 45 por ciento en comparación con la que afrontaría un ciclista en solitario. Solo el corredor que va en cabeza se beneficia de una reducción marginal, lo que explica que los miembros de un equipo suelan relevarse para repartir el esfuerzo. En cualquier caso, y siempre que todos los ciclistas colaboren, salir en un grupo pequeño aumenta sensiblemente las posibilidades de liderar una escapada final.

Aumentemos ahora la escala del problema y consideremos un pelotón entero. Tal fue el caso que en 2018 analizaron Blocken y sus colaboradores cuando estudiaron, mediante simulaciones numéricas y experimentos con un túnel de viento a escala, qué le sucedería a un pelotón denso de 121 ciclistas. Los investigadores hallaron que todos los fenómenos anteriores se amplificaban: la resistencia aerodinámica se reducía en un 14 por ciento para el primer corredor, en casi un 40 por ciento para aquellos situados en los flancos, y hasta en un 95 por ciento para los rezagados al final del todo. En general, un ciclista que avanza en el medio del pelotón tendrá la misma sensación que si rodase a 3,7 metros por segundo, o 13 kilómetros por hora, una velocidad habitual de paseo.

Por supuesto, la elección del lugar en el pelotón no es solo una cuestión energética. Cuanto más atrás se sitúe un ciclista, más sentirá el efecto de «acordeón» causado por las aceleraciones de los corredores que van en cabeza y más quedará expuesto a posibles choques. Por eso, los mejores competidores prefieren mantenerse en las primeras filas rodeados de sus compañeros: la reducción de la resistencia aerodinámica sigue siendo importante (del orden del 20 por ciento), pero les resultará más fácil reaccionar a una escapada repentina de sus rivales. IyC

PARA SABER MÁS

Forces applied to a bicycle during normal cycling. P. D. Soden y B. A. Adeyefa en *Journal of Biomechanics*, vol. 12, págs. 527-541, julio de 1979.

CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists. Bert Blocken et al. en *Computers & Fluids*, vol. 71, págs. 435-445, enero de 2013.

Aerodynamic drag in cycling pelotons: New insights by CFD simulation and wind tunnel testing. Bert Blocken et al. en *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 179, págs. 319-337, agosto de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Equilibrio en bicicleta. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, abril de 2006.

La economía energética de la bicicleta. H. Joachim Schlichting en *IyC*, mayo de 2018.

por Natalie Wolchover

Natalie Wolchover es redactora y editora de *Quanta Magazine*.



Así funciona el teorema de Gödel

Los teoremas de incompletitud de Kurt Gödel acabaron con la búsqueda de una teoría matemática del todo. Noventa años después, seguimos tratando de entender sus consecuencias

EN 1931, Kurt Gödel demostró que todo sistema matemático contendrá afirmaciones imposibles de demostrar.

En 1931, el lógico austriaco Kurt Gödel llevó a cabo el que probablemente podamos calificar como uno de los logros intelectuales más asombrosos de la historia. Por aquel entonces, los matemáticos se habían lanzado a buscar los fundamentos de su disciplina: un conjunto de hechos matemáticos básicos, o axiomas, que fueran al mismo tiempo coherentes (que nunca condujeran a contradicciones) y completos (es decir, a partir de los cuales pudieran construirse todas las verdades matemáticas).

Sus teoremas de incompletitud, publicados cuando contaba solo 25 años, frustraron ese sueño. Gödel demostró que cualquier conjunto de axiomas que podamos postular como base de las matemáticas será irremediablemente incompleto: siempre habrá hechos verdaderos sobre los números que jamás podremos demostrar a partir de esos axiomas. Además, Gödel también probó que ninguno de esos conjuntos de axiomas podría demostrar jamás su propia coherencia.

Los teoremas de incompletitud implican que no puede existir una teoría matemática del todo; ninguna unificación de lo que es demostrable y lo que es cierto. Lo que los matemáticos puedan demostrar dependerá siempre de los supuestos de los que partan, no de una verdad fundamen-

OLENA SHMAHALO/*QUANTA MAGAZINE*

tal a partir de la cual emanen todas las respuestas.

En los noventa años transcurridos desde el hallazgo de Gödel, los matemáticos se han topado con el tipo de preguntas sin respuesta que pronosticaban sus teoremas de incompletitud. Por ejemplo, el propio Gödel contribuyó a establecer que la hipótesis del continuo, relativa a los tamaños del infinito, era indecidible. Lo mismo ocurre con el problema de la parada, o la pregunta de si un programa informático que recibe una entrada aleatoria continuará calculando para siempre o acabará deteniéndose antes o después.

Las cuestiones indecidibles han aparecido incluso en física, lo que parece indicar que la incompletitud de Gödel no solo se circunscribe al mundo de las matemáticas puras, sino que, de algún modo que no acabamos de entender, afectaría también a la propia realidad. Lo que sigue es un resumen simplificado e informal de los argumentos que empleó Gödel para demostrar sus teoremas.

Signo	Número de Gödel	Significado
~	1	no
∨	2	o
⊃	3	implica
∃	4	existe
=	5	es igual a
0	6	cero
s	7	el sucesor de
(	8	signo de puntuación
)	9	signo de puntuación
,	10	signo de puntuación
+	11	más
×	12	por

NÚMEROS DE GÖDEL asociados a un conjunto de símbolos básicos empleados para formular enunciados matemáticos.

La numeración de Gödel

La estrategia clave de Gödel fue encontrar una manera para expresar las afirmaciones *sobre* un sistema de axiomas en términos de las afirmaciones *contenidas* en dicho sistema; esto es, en términos de afirmaciones relativas a los números. Esta correspondencia permite que un sistema de axiomas «hable» sobre sí mismo. Para ello, el primer paso consiste en asignar un número único, denominado «número de Gödel», a cualquier posible enunciado o serie de enunciados matemáticos.

En 1958, Ernest Nagel y James Newman presentaron una versión ligeramente modificada de dicho esquema en su libro *El teorema de Gödel*. Esta comienza con 12 símbolos elementales que sirven como vocabulario para expresar un conjunto de axiomas básicos. Por ejemplo, la afirmación de que algo existe puede expresarse mediante el símbolo ∃, mientras que la suma se denota mediante +. Un símbolo importante es *s*, que significa «sucesor de» y ofrece una manera de especificar los números: *ss*0, por ejemplo, hace referencia al número 2. A estos 12 símbolos se les asignan los números de Gödel del 1 al 12 (*véase la tabla adjunta*).

A continuación, las letras que representan variables, como *X*, *Y* o *Z*, se asocian a los números primos mayores que 12 (13, 17, 19, etcétera). A partir de aquí, es posible asignar un número de Gödel propio a cualquier combinación de símbolos y variables; es decir, a toda fórmula o secuencia de fórmulas aritméticas que podamos construir.

Para verlo, consideremos la fórmula 0 = 0. Los tres símbolos que aparecen en ella tienen asociados los números de Gödel 6, 5 y 6, respectivamente. Ahora hemos de convertir esta secuencia de tres números en uno solo. Este deberá además ser único, en el sentido de que ninguna otra secuencia de símbolos pueda generarlo. Para ello, tomamos los tres primeros números primos (2, 3 y 5), elevamos cada uno de ellos al número de Gödel del símbolo que ocupa la misma posición en la secuencia, y por último los multiplicamos. De esta manera, 0 = 0 se convierte en $2^6 \times 3^5 \times 5^6$, o 243.000.000.

La correspondencia funciona porque dos fórmulas distintas nunca podrán generar el mismo número de Gödel. Todos los números de Gödel son enteros, y solo existe una forma de descomponer un número entero en factores primos. La única descomposición en factores primos de 243.000.000 es $2^6 \times 3^5 \times 5^6$, lo que significa que solo hay una manera posible de descodificar este número de Gödel: la fórmula 0 = 0.

Gödel fue un paso más allá. Dado que una demostración matemática consta de una secuencia ordenada de fórmulas, definió también una manera de asociar un número de Gödel único a cada una de esas secuencias. A tal fin, comenzamos una vez más con la lista de números primos: 2, 3, 5... Luego elevamos cada uno al número de Gödel de la fórmula que ocupa la misma posición en la secuencia (por ejemplo, si 0 = 0 aparece en primer lugar, escribiremos $2^{243.000.000} \times \cdots$), y por último lo multiplicamos todo.

Aritmetizar la metamatemática

La gran ventaja de este procedimiento es que incluso los enunciados metamatemáticos, aquellos que versan sobre las fórmulas aritméticas mismas, pueden traducirse en fórmulas con sus propios números de Gödel.

Empecemos considerando la fórmula ~(0 = 0), que significa «cero no es igual a cero». Esta fórmula es claramente falsa, pero aun así tiene un número de Gödel: 2 elevado a 1 (el número de Gödel del símbolo ~), multiplicado por 3 elevado a 8 (el número de Gödel del paréntesis de apertura), etcétera. El proceso nos da como resultado $2^1 \times 3^8 \times 5^6 \times 7^5 \times 11^6 \times 13^9$. Dado que es posible generar números de Gödel para todas las fórmulas, aunque sean falsas, podemos decir cosas sobre ellas a partir de sus respectivos números de Gödel.

Consideremos la afirmación «el primer símbolo de la fórmula ~(0 = 0) es una tilde». Este enunciado metamatemático (verdadero) sobre ~(0 = 0) puede traducirse en un enunciado sobre el número de Gödel asociado a la fórmula: a saber, que su primer exponente es 1 (el número de Gödel asociado a la tilde). En otras palabras, nuestra afirmación dice que el número $2^1 \times 3^8 \times 5^6 \times 7^5 \times 11^6 \times 13^9$ solo tiene un factor 2. Si ~(0 = 0) empezara con cualquier otro símbolo que no fuera una tilde, su número de Gödel tendría al menos dos factores 2. Así que, siendo más precisos, lo que queremos decir es que 2

es un factor de $2^1 \times 3^8 \times 5^6 \times 7^5 \times 11^6 \times 13^9$, pero 2^2 no lo es.

De igual modo, también podemos convertir la última frase en una expresión aritmética precisa («existe un número entero X tal que X multiplicado por 2 es igual a $2^1 \times 3^8 \times 5^6 \times 7^5 \times 11^6 \times 13^9$, y no existe ningún entero X tal que X multiplicado por 4 sea igual a $2^1 \times 3^8 \times 5^6 \times 7^5 \times 11^6 \times 13^9$») y escribirla mediante símbolos elementales. Y por supuesto, dicha fórmula tendrá también un número de Gödel, el cual podremos calcular transformando sus símbolos en potencias de números primos.

Este ejemplo, escribieron Nagel y Newman, «ilustra una idea muy general y profunda que constituye el núcleo del descubrimiento de Gödel: es posible hablar, de un modo indirecto pero perfectamente preciso, sobre las propiedades tipográficas de una larga cadena de símbolos analizando, en su lugar, las propiedades de la descomposición en factores primos de un número entero grande».

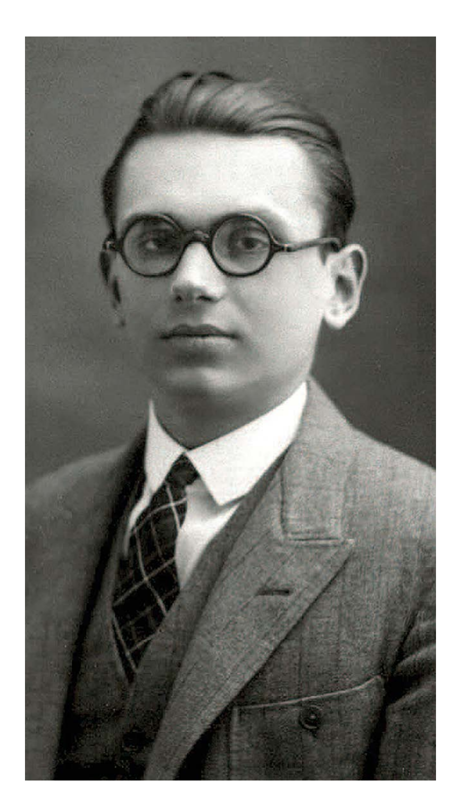
También podemos convertir en símbolos el enunciado metamatemático «existe una secuencia de fórmulas con número de Gödel X que demuestra la fórmula con número de Gödel K». O, de manera más sucinta, «es posible demostrar la fórmula con número de Gödel K». Fue la posibilidad de «aritmetizar» este tipo de enunciados lo que abrió las puertas a los teoremas de incompletitud.

G habla sobre *G*

Fue aquí donde Gödel tuvo una idea brillante. Se percató de que podía tomar el número de Gödel de una fórmula y sustituirlo en la propia fórmula.

Para entender cómo funciona esta sustitución, consideremos la fórmula $(\exists X)(X = sY)$, que significa «existe alguna variable X que es el sucesor de Y»; o, en pocas palabras, «Y tiene un sucesor». Como todas las fórmulas, esta posee un número de Gödel: algún número entero grande al que llamaremos M.

Ahora, tomemos la fórmula de partida y sustituyamos el símbolo Y por M. Esto genera una nueva fórmula, $(\exists X)(X = sM)$, que significa «M tiene un sucesor». ¿Cómo podemos llamar al número de Gödel de esta expresión? Hay que reflejar tres cosas: hemos empezado con la fórmula que tiene número de Gödel M; en ella, hemos sustituido el símbolo Y por M; y, de acuerdo con el esquema de asignación que hemos introducido al principio, el símbolo Y es el que tiene número de Gödel 17. Así pues, designemos el número de Gödel de la nueva fórmula como sust(M, M, 17). Este tipo de sustitución encierra el quid de la demostración de Gödel.



KURT GÖDEL durante su época de estudiante en Viena. Gödel publicó sus teoremas de incompletitud cuando contaba 25 años, justo después de finalizar su doctorado.

CENTRO DOCUMENTAL SHELBY WHITE Y LEON LEVY/INSTITUTO DE ESTUDIOS AVANZADOS DE PRINCETON (DOMINIO PÚBLICO)

Gödel consideró un enunciado metamatemático del tipo «la fórmula con número de Gödel sust(Y, Y, 17) no se puede demostrar». De acuerdo con la notación que acabamos de introducir, la fórmula con número de Gödel sust(Y, Y, 17) es la que se obtiene al tomar la fórmula con número de Gödel Y (una variable desconocida) y, en cualquier lugar donde aparezca el símbolo con número de Gödel 17 (es decir, en cualquier lugar donde haya una Y), reemplazarlo por dicha variable Y.

La cosa está empezando a complicarse, pero lo que es seguro es que nuestra afirmación metamatemática «la fórmula con número de Gödel sust(Y, Y, 17) no se puede demostrar» se traduce en una fórmula con un número de Gödel único. Llamémoslo N.

Hagamos ahora una última sustitución: Gödel creó una nueva fórmula insertando el número N en cualquier lugar donde hubiera una Y en la fórmula anterior. Esa nueva fórmula dice «la fórmula con número de Gödel sust(N, N, 17) no se puede demostrar». Llamemos ***G*** a esta última fórmula.

Por supuesto, ***G*** tiene un número de Gödel. ¿Cuál es? He aquí la sorpresa: dicho número de Gödel solo puede ser sust(N, N, 17). Por definición, sust(N, N, 17) es el número de Gödel de la fórmula que resulta de tomar la fórmula con número de Gödel N y, en cualquier lugar donde haya un símbolo con número de Gödel 17, reemplazarlo por N. ¡Y esa fórmula resultante es justo ***G***! Debido a la unicidad de la descomposición en factores primos, ahora vemos que la fórmula de la que habla ***G*** no es sino la propia ***G***. Y ***G*** está afirmando sobre sí misma que es indemostrable.

Pero ¿es posible demostrar ***G***? Si así fuera, querría decir que hay alguna secuencia de fórmulas que demuestra la fórmula con número de Gödel sust(N, N, 17). Pero eso es lo contrario de lo que afirma ***G***, que nos asegura que no existe tal demostración. En un sistema coherente de axiomas, no es posible que dos enunciados opuestos, ***G*** y ~***G***, sean ambos verdaderos. Por tanto, la verdad de ***G*** solo puede ser indecidible.

Sin embargo, aunque ***G*** sea indecidible, está claro que es cierta. ***G*** afirma que «la fórmula con número de Gödel sust(N, N, 17) no se puede demostrar». ¡Y eso es justamente lo que hemos hallado! Dado que ***G*** es verdadera pero indecidible dentro del sistema de axiomas que hemos usado para construirla, dicho sistema es necesariamente incompleto.

Cabe pensar que tal vez podríamos postular algún axioma adicional, usarlo para demostrar ***G*** y resolver la paradoja. Sin embargo, algo así no es posible. Gödel demostró que, siguiendo un esquema similar al que acabamos de emplear, ese sistema extendido de axiomas permitiría construir una nueva fórmula verdadera, ***G'***, la cual no podría demostrarse dentro del nuevo sistema extendido. Así pues, todo intento de obtener un sistema matemático completo será siempre como una pescadilla que se muerde la cola.

El segundo teorema

Hemos visto que, si un conjunto de axiomas es coherente, entonces es incompleto. Este es el primer teorema de Gödel. El segundo —que ningún conjunto de axiomas puede demostrar su propia coherencia— puede deducirse fácilmente a partir de él.

¿Qué significaría que un conjunto de axiomas pudiera demostrar que nunca conduce a una contradicción? Querría decir que existe una secuencia de fórmulas construida a partir de esos axiomas que demuestra la fórmula que, desde un punto de vista metamatemático, dice «este conjunto de axiomas es coherente». Por el primer teorema, ese conjunto de axiomas sería entonces necesariamente incompleto.

Pero «el conjunto de axiomas es incompleto» es lo mismo que decir «existe alguna fórmula verdadera que no se puede demostrar». Esta afirmación es equivalente a nuestra fórmula ***G***. Y sabemos que los axiomas no pueden demostrar ***G***.

Así que Gödel construyó una demostración por contradicción: si un conjunto de axiomas pudiera demostrar su propia coherencia, entonces seríamos capaces de demostrar ***G***. Pero no podemos, de modo que ningún conjunto de axiomas puede demostrar su propia coherencia.

Los teoremas de Gödel acabaron con la búsqueda de un sistema matemático coherente y completo. El significado de la incompletitud «sigue sin comprenderse del todo», escribieron Nagel y Newman en 1958. Hoy en día, eso continúa siendo cierto. IyC

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. Kurt Gödel en *Monatshefte für Mathematik und Physik*, vol. 38, págs. 173-198, diciembre de 1931.

El teorema de Gödel. Ernst Nagel y James R. Newman. Editorial Tecnos, 2007.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ordenadores, paradojas y fundamentos de las matemáticas. Gregory J. Chaitin en *IyC*, julio de 2003.

Ordenadores y números naturales. Agustín Rayo en *IyC*, abril de 2012.

Gödel y la verdad axiomática. Agustín Rayo en *IyC*, febrero de 2014.

El problema sin solución. Toby S. Cubitt, David Pérez-García y Michael Wolf en *IyC*, diciembre de 2018.

Demostrar la hipótesis del continuo. Jean-Paul Delahaye en *IyC*, mayo de 2020.



ANIMALES EJEMPLARES

Juan Ignacio Pérez y Yolanda González
Next Door Publishers, 2020
288 págs.

Infinidad de formas bellas

Una invitación a pensar los talentos animales y su evolución

Animales ejemplares nos invita a examinar las formas de vida animal con relación a los medios, los climas, las necesidades metabólicas y reproductivas, las migraciones, la geología terrestre o los vínculos de unos con otros. Tras introducir la evolución animal, 39 capítulos breves indagan en el metabolismo o comportamiento concreto de alguna especie, en un recorrido que va desde la curiosidad o familiaridad hasta los trabajos científicos que iluminan esa capacidad o talento especial de los animales considerados. Los comentarios arrancan con fragmentos de poesías o canciones y con frecuencia se cita a Aristóteles, Buffon, Darwin o Thoreau, entre otros naturalistas clásicos. Cada texto se acompaña de grandes láminas coloreadas de la artista especializada en ilustración científica Yolanda González, las cuales centran la atención y fijan en la memoria algún aspecto esencial del comentario.

El autor de los textos, Juan Ignacio Pérez, catedrático de fisiología de la Universidad del País Vasco y gran promotor de la cultura científica, no elabora una teoría o marco explicativo general ni trata de abarcar toda la diversidad animal. Aunque están lejos de ser puras invenciones como las *Just so stories* de Rudyard Kipling, las historias de este libro, como aquellas, apelan a la imaginación y a la empatía y profundizan en el entendimiento científico para ir más allá de la fascinación estética que nos suscitan las formas de vida animal. Se podría decir que, implícitamente, se demanda una cultura científica amplia, imbricada y embebida en los conocimientos filosóficos, literarios y artísticos que la pueden hacer no solo más creíble o atractiva, sino también más verdadera.

Muchas historias se refieren al metabolismo. Por ejemplo, a la forma en que se gestiona la relación entre el medio interno y el externo en los peces según vivan en agua dulce o de mar, a los mecanismos que permiten la oxigenación en altitudes extremas, o a los métodos para generar o mantener calor o una diferencia significativa de temperatura con respecto al medio, particularmente cuando no hay más remedio que migrar para sobrevivir. Varios ejemplos muestran que existen soluciones similares ante problemas similares, como las variedades de hemoglobina y mioglobina de alta afinidad por el oxígeno; o la *rete mirabile* («red maravillosa»), la organización circulatoria que ayuda a conservar la temperatura corporal.

Desde la perspectiva evolutiva nos preguntaríamos si esas formas que parecen ser «lo mismo» en taxones filogenéticamente alejados son homologías o soluciones convergentes ante las mismas presiones selectivas. En efecto, una cuestión a debate en biología ha sido la manera en que se complementan las causas evolutivas y las mecánicas. El fisiólogo Claude Bernard no creía que los linajes evolutivos contribuyesen al estudio del funcionamiento orgánico, que, desde su punto de vista, debía ser experimental. En cambio, Ernst Mayr y el ímpetu de la síntesis moderna han defendido lo contrario: que sin la evolución no pueden responderse los porqués. En la actualidad, una «síntesis extendida» trata de seguir integrando los conocimientos de las diferentes disciplinas biológicas, y muchos de los ejemplos del libro aportan detalles fisiológicos de las formas de vida que iluminan su evolución.

Naturalistas como Buffon o Darwin subrayaron la dificultad de entender la evolución si no se atiende al tiempo. Dado que el tiempo configura la geología de la Tierra tanto como a los seres vivos, en la evolución del «sistema Tierra», todo, geología y vida, forma un conjunto imbricado modulado por la temporalidad. En este sentido, *Animales ejemplares* cuenta que los gansos del Himalaya sobrevuelan las montañas subiendo y bajando los picos como en una montaña rusa, en un medio en el que, por falta de aire, apenas hay oxígeno. Ello sugiere que probablemente sepan hacerlo porque las aves ya estaban ahí antes de que las montañas fueran tan altas.

La biología evolutiva se ha asociado a menudo con una visión de la naturaleza basada en la competencia y en la que abundan las imágenes bélicas. Ya Darwin habló de la naturaleza «roja en diente y garra», mientras que estudiar «carreras de armamentos» parece otra metáfora de ese talante, influida en este caso por la Guerra Fría de los tiempos en que se desarrolló ese darwinismo basado en la genética de poblaciones. Los venenos como la paralizante tetrodotoxina del pez globo de los relatos de Cook o la piel de algunas salamandras venenosas, además de algunas historias mitológicas, como la del kraken, se asocian a esa disposición a competir. Sin embargo, en la naturaleza no faltan destellos de cooperación.

Al respecto destaca el caso del pingüino emperador, que no solo calienta el huevo en el frío antártico, sino que alimenta al polluelo recién nacido con su propia leche del esófago mientras espera semanas a que la madre vuelva del mar, al tiempo que mantiene la temperatura formando parte de un grupo enorme de individuos que rotan de fuera adentro para calentarse. Otro ejemplo revelador es el de una serpiente macho que genera hormonas femeninas. Podríamos pensar que se trata de una estrategia de engaño para ser el primero en fecundar. Pero, como señala Pérez, cabe otra interpretación: «Buscarían ser rodeados por los demás machos en un momento como es el inmediatamente posterior a salir de la hibernación, de especial desamparo. Se beneficiarían así del calor que aquellos desprenden al rodearlo en pleno frenesí y lo protegerían, además, de posibles depredadores en ese difícil trance». En filosofía hablaríamos de una infradeterminación de la teoría por los datos, pues ambas hipótesis son igualmente compati-

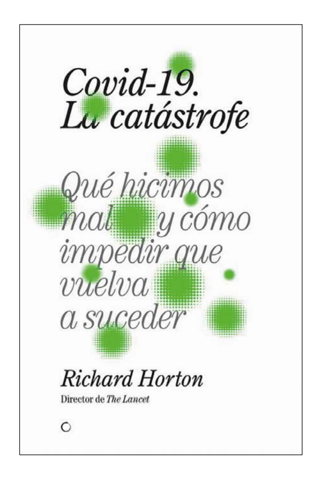
bles con las pruebas disponibles. Filósofas como Helen Longino han mostrado que estos casos permiten arrojar luz sobre las suposiciones que orientan las hipótesis y ayudan a reconsiderarlas. Algo similar creo que ocurre con el binomio de naturaleza competitiva y cooperativa, el cual convendría revisar.

Por supuesto, la ciencia no lo sabe todo sobre los animales. Las creencias falsas, como que los dromedarios tienen un depósito para el agua, que las anguilas surgen por generación espontánea o que no hay peces pulmonados, se van reemplazando por otras a la luz de los datos. Sin embargo, aún no sabemos cómo desovan las anguilas en los Sargazos, por qué se despiertan los osos de su hibernación si ello les supone un gran coste metabólico, o si ciertas rapaces propagan deliberadamente los incendios. También existe el miedo de que haya cosas que no podamos saber jamás debido a las extinciones o a los efectos del cambio climático. Por otra parte, quizás haya que cambiar algunos supuestos básicos. Por ejemplo, la definición habitual de los animales como seres formados exclusivamente por células eucariotas podría pronto quedar obsoleta a la luz de las pruebas crecientes de la integración de bacterias y otros procariotas en su desarrollo, evolución y funcionamiento.

En cuanto a los humanos, es posible que al autor le sucediera lo que a Epimeteo, quien, según comenta Platón en el *Protágoras*, se olvidó de ellos al repartir los dones entre los animales. También aquí el humano se ve relegado a personaje secundario, aunque aparece cuando se revisa la manera en que zorros y coyotes tratan de compartir sus espacios mediante una autodomesticación semejante a la que vivieron los perros, o en cooperaciones extraordinarias como la de los borana de Kenia, que, en una extraña simbiosis, siguen a los pájaros indicadores para encontrar paneles de miel.

Animales ejemplares ofrece estampas penetrantes que, por el rigor científico con que están tratadas, incitan a continuar pensando sobre los animales. En una sección final se discurre sobre el ciclo de la vida. En el caso de los animales y demás seres vivos, la «razón de ser de su existencia» solo puede entenderse como relacionada con otras formas: deben sus formas actuales a las pasadas y, más allá de la duración limitada de su vida individual, «viven por aquellos que los sucederán», en palabras de Pérez. Esa es una clave importante para entender este libro, una gran invitación a reparar en las conexiones geográficas y temporales que conforman las formas de vida de los animales.

—Arantza Etxeberria Agiriano
Departamento de Filosofía
Universidad del País Vasco



COVID-19, LA CATÁSTROFE
QUÉ HICIMOS MAL Y CÓMO IMPEDIR QUE VUELVA A SUCEDER
Richard Horton
Antoni Bosch, 2021
198 págs.

La catástrofe de la COVID-19 desde la atalaya del editor de *The Lancet*

Una crítica feroz a cómo han gestionado la pandemia muchos Gobiernos occidentales y una invitación a iniciar un debate nacional

Richard Horton es desde 1995 el redactor jefe de la prestigiosa revista de medicina *The Lancet*. Tras estudiar medicina en la Universidad de Birmingham ejerció como médico en el Hospital Royal Free de Londres. Es también profesor honorario de la Escuela de Higiene y Medicina Tropical de Londres y de la Universidad de Oslo. Además, ha desempeñado diversas funciones en la Organización Mundial de la Salud (OMS). Desde hace años se ha implicado en varias polémicas relacionadas con la ciencia, la medicina y la política, fruto de su compromiso con la gestión de la salud pública.

En marzo de 2020 ofreció algunas entrevistas que se hicieron virales. En ellas calificaba como un «escándalo nacional» la situación que se estaba viviendo en el Reino Unido y criticaba fuertemente al Gobierno por estar perdiendo el tiempo ante una situación «prevenible». Según Horton, se había malgastado el mes de febrero cuando se deberían haber hecho tests masivos y conseguido equipos de protección personal. Si de algo no se le puede acusar a Horton es de no hablar claro o de tener una actitud a posteriori.

En *COVID-19, la catástrofe*, Horton hace una crítica feroz a la lenta respuesta inicial de muchos Gobiernos occidentales, a su autocomplacencia sobre los preparativos para las olas posteriores de la pandemia, y a la falta de un respaldo suficiente para los afectados por la crisis económica. Según él, el desastre económico derivado de la COVID-19 era totalmente previsible y ahora toca pedir «un ajuste de cuentas». Curiosamente, un grupo de expertos convocados por la OMS llegó a conclusiones similares el pasado mes de mayo: la pandemia era previsible, los Gobiernos y la propia OMS actuaron tarde y se perdió el tiempo durante un mes crucial.

Desde su situación «privilegiada» —probablemente han sido miles los manuscritos científicos sobre el SARS-CoV-2 y la COVID-19 que han pasado por sus manos durante este último año y medio—, Horton nos describe un panorama desolador, quizá demasiado pesimista. El libro incluye un repaso detallado de la situación en varias naciones, desde China o Nueva Zelanda hasta el Reino Unido o EE.UU., pasando por España, Suecia y otros países de la Unión Europea. Proporciona una visión internacional de cómo se gestionó la pandemia durante los primeros meses y, aunque la pandemia va tan deprisa que algunos datos e interpretaciones ya han sido superados, revisa buena parte de las preguntas que muchos nos hemos hecho en los últimos tiempos, el papel de los confinamientos, el coste económico y social, etcétera [*véase* «Pensar la epidemiología en tiempos de COVID-19», por Lino Camprubí; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2020].

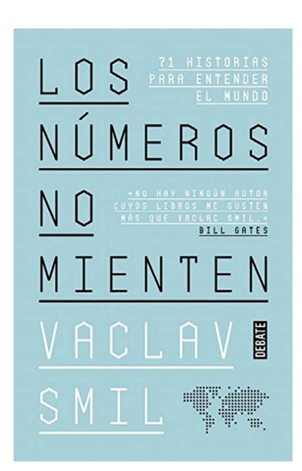
La falta de liderazgo y de coordinación, las tensiones geopolíticas, el excesivo nacionalismo o patriotismo imperante en muchos países y un sistema de salud deficiente fueron la «tormenta perfecta» para que un nuevo coronavirus causara una catástrofe global, «el mayor fracaso político de las democracias occidentales desde la Segunda Guerra Mundial». Hemos sido incapaces de coordinarnos y actuar juntos. Los fallos de comunicación, la falta de transparencia, una crisis de confianza o la nula cooperación y solidaridad han sido comunes en la mayoría de los países. En general, la pandemia se ha gestionado tarde y mal, los Gobiernos autocomplacientes no han hecho autocrítica y cada país debería iniciar un debate nacional, algo que en España ha sido evitado por el actual Gobierno.

En el libro se echa de menos una mayor revisión del papel de la propia OMS y de la ciencia en general. Omite, quizá por propio interés, el rol que ha desempeñado el sistema de publicaciones científicas y la velocidad a la que se han publicado muchas investigaciones. En poco más de un año han visto la luz más de 120.000 artículos sobre el virus SARS-CoV-2 y la enfermedad COVID-19, más que sobre malaria. Esto constituye una muestra fascinante de la tremenda actividad científica que ha generado la pandemia, pero también ha supuesto un problema: ninguna editorial, ninguna revista ni los propios científicos han sido capaces de asimilar tal cantidad de información. Entre todos esos artículos, algunos en forma de prepublicaciones, quizás esté la solución a nuestros problemas mezclada con falsas interpretaciones, comentarios erróneos o incluso auténticos fraudes científicos, como el que publicó la propia *The Lancet* y se conoció como *Lancetgate*: un artículo sobre la hidroxicloroquina que también publicó el *New England Journal of Medicine* y que resultó ser un fraude científico del que ambas revistas tuvieron que retractarse. La ciencia a «alta velocidad» y el exceso de información han sido también un problema en un mundo globalizado por las redes sociales, que han acabado causando una pandemia de bulos y mentiras [*véase* «El coronavirus más mediático», por Ignacio López-Goñi; Investigación y Ciencia, abril de 2020].

Covid-19, la catástrofe es un libro muy recomendable: fácil de leer, atractivo por su tremenda actualidad y con mensajes muy sugerentes que invitan al lector a reflexionar. La pandemia, como otras a lo largo de la historia, ha causado profundos cambios en la sociedad. Como todos los desastres, las pandemias son catalizadoras de cambio político y social, y de ellas siempre hemos salido más pobres y con mayores diferencias sociales. Ojalá esta triste experiencia sea el motor hacia una sociedad más justa y solidaria.

En uno de sus últimos capítulos, el autor hace una reflexión sobre cómo la COVID-19 transformará la sociedad, los Gobiernos, la gente y la ciencia. La COVID-19 no es un acontecimiento, sino el comienzo de una nueva época. Ha introducido nuevas voces en la política, como la voz de la ciencia. En tiempos de crisis, los Gobiernos se vuelven más tecnocráticos, y quizá comience una nueva etapa política en que la tecnocracia sustituirá a los populismos. Una lectura muy sugerente que reflexiona sobre qué hicimos mal y que apunta cómo impedir que algo así vuelva a ocurrir. Porque, si de algo estamos seguros, es de que habrá nuevas pandemias.

—Ignacio López-Goñi
Departamento de Microbiología y Parasitología
Universidad de Navarra



LOS NÚMEROS NO MIENTEN
71 HISTORIAS PARA ENTENDER EL MUNDO
Vaclav Smil
Debate, 2021
336 págs.

La realidad a la luz de los números

De la información al contexto: un polifacético viaje a través de las cifras para comprender mejor el mundo en que vivimos

Vivimos en la era de los grandes conjuntos de datos. La cantidad de información y estadísticas de la que disponemos hoy en día es simplemente abrumadora y no para de crecer. Esta tendencia se ha visto estimulada por las continuas mejoras en nuestra capacidad de almacenar y procesar datos, así como por el uso creciente de dispositivos que los generan y transmiten (como nuestros teléfonos móviles) o por nuestra actividad en Internet. Se estima que, de media, cada uno de los cerca de 8000 millones de habitantes de nuestro planeta genera cada segundo 1,7 magaoctetos de información. Los datos son también cada vez más importantes a la hora de tomar decisiones de gran calado social, político y económico. Buena muestra de ello la ha proporcionado la pandemia actual, ya que las cifras sobre contagios, fallecidos y ocupación de camas en las unidades de cuidados intensivos no es solo lo primero que vemos al abrir un periódico o ver un informativo en la televisión, sino que determinan si las escuelas o los comercios permanecerán abiertos, si podremos visitar a familiares y amigos o si podremos viajar durante nuestras próximas vacaciones.

Con semejante cantidad de datos a nuestra disposición, cabría esperar que tanto nuestra comprensión del mundo como las decisiones que tomamos estuvieran guiadas en todo momento por la mejor información disponible. No es objeto de esta reseña discutir por qué lamentablemente esto no siempre ocurre, pero sí hablar sobre un libro que pretende ilustrarnos y convencernos de la relevancia de los números para entender el mundo.

Los números no mienten es una de las últimas obras de Vaclav Smil, un reconocido profesor emérito de la Universidad de Manitoba que lleva varias décadas estudiando y divulgando sobre cuestiones fundamentales para la sociedad, desde la producción de alimentos y las innovaciones tecnológicas hasta las fuentes de energía o la evolución del entorno natural.

A lo largo de 71 capítulos, que son una recopilación de las columnas mensuales que durante años ha publicado en la revista de ingeniería *IEEE Spectrum* (junto con alguna nueva), Smil nos invita a sumergirnos en el fascinante mundo de los números y las estadísticas para comprender y poner en contexto aspectos clave de nuestro mundo y la evolución de la sociedad.

Agrupados en siete grandes bloques (personas, países, máquinas, energía, transporte, alimentos y medioambiente), estos breves capítulos, de entre 3 y 5 páginas cada uno, tratan cuestiones de lo más variopintas: desde si existe una excepcionalidad estadounidense hasta las personas necesarias para construir la Gran Pirámide de Guiza, pasando por el ritmo de las transiciones energéticas, el desperdicio alimentario global o la eficiencia de las calefacciones domésticas.

Con un lenguaje sencillo y muy ameno, y ayudado por un sinfín de ejemplos, gráficas y datos —muchos de ellos francamente curiosos—, el autor nos ayuda a conocer mejor cómo somos y cómo hemos cambiado en épocas recientes o cómo nos alimentamos, nos movemos e impactamos sobre el entorno natural. El lector encontrará en estas páginas respuestas a un buen número de preguntas interesantes y curiosas. Resulta difícil seleccionar alguna, pero si desean saber por qué se crían tantos pollos, si pesamos más las personas que habitamos la Tierra o las vacas que criamos, o si nuestro teléfono es más perjudicial para el medio que nuestro coche, ya saben qué leer.

A partir de las pruebas que proporcionan los datos, Smil desafía muchos de nuestros prejuicios y nos invita a reflexionar sobre cuestiones fundamentales para la sostenibilidad de nuestras sociedades. Entre ellas, la imperiosa necesidad de abordar nuestro sistema de producción, distribución y consumo de alimentos (que en términos globales despilfarra alrededor de un tercio de todo lo que produce cada año) y el fenomenal reto que supone sustituir los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables.

Los números no mienten es una joya para todas las personas curiosas y un libro tan ilustrativo como entretenido, una virtud que no resulta fácil de encontrar en ensayos de esta naturaleza. Es también de agradecer su detallado índice, el cual facilitará la búsqueda de temas, datos y nombres una vez leída la obra. Esta contiene también bibliografía adicional para profundizar en las cuestiones tratadas en cada capítulo, si bien no incluye las referencias de todos los estudios que se mencionan en el texto, lo que impide identificar y consultar esos trabajos para contrastar o ampliar la información. Otro aspecto mejorable es que no se proporcionen las fuentes concretas de las distintas figuras incluidas en la obra, las cuales son el corazón de la misma. También aquí, la adición de las fuentes permitiría ampliar la información sin que el libro perdiera un ápice de su legibilidad e interés para el gran público. La enorme variedad de los temas tratados y la brevedad de los capítulos hacen que el texto resulte algo heterogéneo y que unos capítulos estén mejor cerrados que otros. Y aunque esto no suponga un problema en sí, el tratamiento de algunos temas decididamente complejos se le quedará corto a más de un lector. Con todo, hay también que aplaudir al autor por ser capaz de condensar tanta información relevante en tan poco espacio.

Una de las principales lecciones que podemos extraer de *Los números no mienten* es la necesidad de poner en contexto los datos; ya que, como bien recuerda el autor al comienzo del libro, «para entender lo que ocurre realmente en nuestro mundo debemos situar los números en los contextos adecuados». Esto es algo que Smil ha conseguido hacer magistralmente y que cobra particular relevancia en momentos como los actuales. Hoy en día estamos expuestos continuamente a información, estadísticas, medias verdades y realidades alternativas, y la inmediatez y brevedad de los mensajes que se lanzan en las redes sociales favorecen que las cifras se saquen de contexto con demasiada frecuencia.

Nos encontramos, pues, frente a un ensayo muy recomendable para todos aquellos interesados en conocer mejor cómo es nuestro mundo y cómo hemos llegado hasta aquí. *Los números no mienten* proporciona también muchos elementos (¿o más bien deberíamos decir números?) para reflexionar sobre nuestro futuro y los retos que nos aguardan. Como bien nos dice Smil, los números no mienten, pero ¿estamos utilizando la verdad que transmiten para solucionar los principales problemas que nos afectan? Una pregunta para la que este reseñador no tiene una buena respuesta y que bien podría ser un tema digno de su próximo libro.

—Fernando T. Maestre
Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio Ramon Margalef
Universidad de Alicante

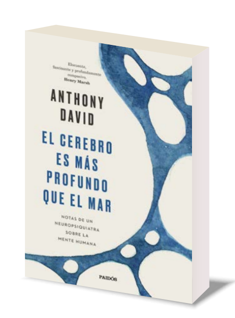
NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



TEORÍA GENERAL DEL MAGNETISMO TERRESTRE

Carl Friedrich Gauss
Introducción, traducción y notas de José Manuel Vaquero
Catarata, 2021
ISBN: 978-84-1352-164-0
128 págs. (12 €)



EL CEREBRO ES MÁS PROFUNDO QUE EL MAR
NOTAS DE UN NEUROPSIQUIATRA SOBRE LA MENTE HUMANA

Anthony David
Paidós, 2021
ISBN: 978-84-493-3816-8
224 págs. (20 €)

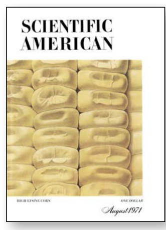


LA GRAN FAMILIA DE LOS NÚMEROS

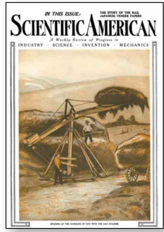
Raúl Ibáñez Torres
Catarata, 2021
ISBN: 978-84-1352-225-8
160 págs. (15 €)

Recopilación de Mark Fischetti

AGOSTO



1971



1921



1871

1971

¿Cómo controlan las langostas la guiñada?

«Igual que los aviones, los insectos pueden alabear sobre su eje longitudinal, cabecear sobre el eje transversal y guiñar sobre el vertical. Parece que las langostas tienen dos estrategias para corregir la guiñada: (1) un rápido cambio en la inclinación de las alas y en la posición del abdomen y las patas, controlado por pelos en la cabeza sensibles al viento, y (2) un movimiento más lento y sutil de las mismas características dirigido por receptores cervicales. Al parecer, la variación del ángulo del viento, que indica la guiñada, se integra en algún punto del sistema nervioso central del insecto, y a ella le siguen órdenes motrices independientes para las alas, las patas, el abdomen y la cabeza.»

1921

El sabor de la radio

«Hace poco, dos ingenieros han realizado experimentos para determinar la viabilidad de recibir señales de radio mediante el sentido del gusto. Bajo la lengua se colocaron unos electrodos que produjeran una sensación gustativa cuando a ellos se conectara una fuente de potencial [eléctrico]. Las pruebas se hicieron con una corriente continua de baja tensión y con una corriente alterna de 60 ciclos, con el fin de averiguar la cantidad de energía y la corriente necesarias para la recepción gustativa. Se comprobó la recepción de señales reales procedentes de una antena. Y se halló imposible, [incluso con] cuatro etapas de amplificación. Los resultados indican que, si bien desde el punto de vista eléctrico es posible recibir señales de radio con el sentido del gusto, esa recepción es muy inferior a la auditiva, e incluso a la visual.»

Un naranjo que no descansa

«En un pequeño naranjal de Avon-Park, en Florida, unos horticultores han descubierto un naranjo que fructifica durante todo el año y que los cultivadores creen destinado a revolucionar la industria cítrica. Para proteger el ejemplar, sus compradores lo han cercado con una pesada valla de alambre de seis metros de altura y han colocado centinelas noche y día. El árbol llevaba ocho años dando frutos sin parar, pero su existencia la conocía solo el dueño y algunos vecinos, quienes, según expertos en cítricos, no se daban cuenta de su valor, sino que meramente lo consideraban una anomalía de la naturaleza. Se ha formado un sindicato para propagar este árbol de modo que, en 1923, pueda estar presente en gran número en los naranjales.»

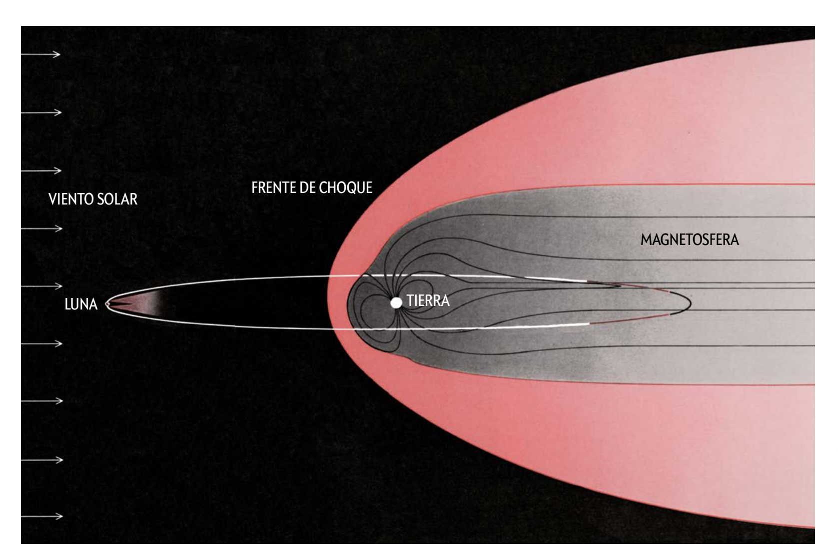
1871

Pieles falsas antiguas

«El hule se usa mucho como sustituto de la piel. Su uso más importante es para forro de techos de carruajes, para bolsas de viaje y maleteros, y no rara vez se trata para hacer abrigos y pantalones impermeables. La base es tela de algodón que se hace pasar lentamente por los rodillos de hierro de una máquina. Recibe primero una capa de una sustancia negra, de aspecto desagradable, compuesta de aceite, negro de humo, resina y otros ingredientes, cocidos juntos hasta la consistencia de la brea fundida. Luego la tela se arrolla sobre un gran bastidor de madera que se introduce en una estufa para que se seque. Seguidamente se extiende en mesas largas, donde operarios la rocían con agua y la frotan con piedra pómez, hasta que toda la superficie queda perfectamente tersa. El tejido se barniza a fondo y vuelve a pasarse por la estufa. Ya es entonces una pieza de tela con una reluciente capa gruesa de color negro, muy parecida al charol.»

Virtudes del cloroformo

«El cloroformo es el mejor de los solventes conocidos del alcanfor, las resinas y el lacre; también disuelve los alcaloides vegetales. Como solvente, elimina las manchas de grasa de toda clase de tejidos, pero su uso principal es el de anestésico. Otras varias sustancias orgánicas volátiles poseen propiedades similares, pero ninguna produce la inconsciencia total y la relajación muscular que sigue a la inhalación de cloroformo.»



1971: De la interacción de las partículas del «viento solar» con el campo magnético terrestre se forma la magnetosfera (*gris*). Esta es una capa que a su vez produce un frente de choque (*rojo*). Cuando la Luna se halla dentro de la magnetosfera, su entorno magnético está dominado por el de la Tierra. En la envoltura magnética intermedia (*color claro*) hay un flujo errático de partículas y el campo más turbulento de la órbita lunar.

DAN TODD; *SCIENTIFIC AMERICAN*, VOL. 225, N.º 2, AGOSTO DE 1971

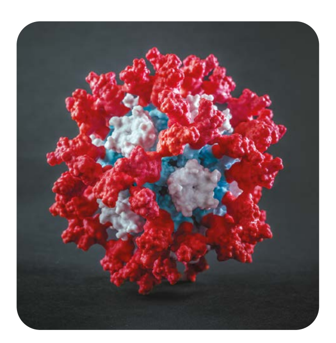


BIOQUÍMICA

Proteínas artificiales

Rowan Jacobsen

Las nuevas moléculas podrían revolucionar la biología y dar lugar a una nueva vacuna contra la COVID-19.



CONTAMINACIÓN

Los riesgos de los microplásticos

XiaoZhi Lim

¿Cómo afectan a la salud los diminutos plásticos que van a parar a nuestro cuerpo y al de los organismos marinos?

CAMBIO CLIMÁTICO

Las rocas de carbono de Omán

Douglas Fox

¿Podría un inusual afloramiento rocoso del interior de la Tierra solucionar el problema climático mundial?



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Javier Grande: *Apuntes*, *Tres misiones para desvelar los misterios de Venus*, *La física cuántica reescribe la causalidad*, *¿Está la Tierra preparada para evitar un asteroide?* y *Así funciona el teorema de Gödel*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *La emergencia de las infecciones fúngicas*; M. Gonzalo Claros: *Fuerzas celulares que moldean la vida*; Xavier Roqué: *La construcción científica de la ignorancia* y *La medicina de la Revolución francesa*; Pedro Pacheco: *Economías alternativas para un mundo sostenible*; Ernesto Lozano: *Chupar rueda en el pelotón*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España